



Ověření mechanických vlastností optimalizovaného dílu vyrobeného pomocí 3D tisku

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T010 – Konstrukce strojů a zařízení
Autor práce: **Bc. Adam Luke**
Vedoucí práce: Ing. Petr Zelený, Ph.D.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Adam Luke**
Osobní číslo: **S13000470**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce strojů a zařízení**
Název tématu: **Ověření mechanických vlastností optimalizovaného dílu vyrobeného pomocí 3D tisku**
Zadávací katedra: **Katedra výrobních systémů a automatizace**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Hlavním cílem této práce je provést návrh optimalizovaného dílce metodou MKP. Otestovat mechanické vlastnosti vyrobeného dílu a určit výhody či nevýhody výroby pomocí technologie 3D tisku v porovnání s konvenční technologií.

Doporučené metody pro vypracování:

1. Provedení rešerše o technologii 3D tisku se zaměřením na metodu SLM.
2. Návrh CAD modelu testovacího dílce - přední těhlice vozu Formula SAE pro výrobu metodou SLM a konvenční metodou - např. frézování.
3. Výpočtová analýza navržených CAD modelů s použitím MKP.
4. Výroba prototypů a testování jejich mechanických vlastností.
5. Porovnání metody SLM s konvenční metodou (např. frézování) z hlediska vhodnosti pro výrobu daného testovacího dílce.



Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah pracovní zprávy: **60 stran textu včetně příloh**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

- [1] **SHIGLEY, J.E., Ch.R. MISCHKE a R.G. BUDYNAS.** *Konstruování strojních součástí.* Brno: VUTUM, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [2] **NOORANI, R.** *Rapid Prototyping: principles and applications.* Hoboken: John Wiley and Sons, 2006. ISBN 0-471-73001-7.
- [3] **JACOBS, P. F.** *Stereolithography and other RPand M technologies: from rapid prototyping to rapid tooling.* New York: ASME Press, 1996. ISBN 0-87263-467-1.
- [4] **GIBSON, I., D.W. ROSEN a B. STUCKER.** *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing.* New York: Springer, 2010. ISBN 978-1-4419-1119-3.
- [5] **HOPKINSON, N., R. HAGUE a P. DICKENS.** *Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age.* Chichester: Wiley, 2006. ISBN 978-0-470-01613-8.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Zelený, Ph.D.**
Katedra výrobních systémů a automatizace
Konzultant diplomové práce: **Ing. Miloš Čadek**
Datum zadání diplomové práce: **15. listopadu 2015**
Termín odevzdání diplomové práce: **15. února 2017**

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan



Ing. Petr Zelený, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 15. listopadu 2015

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.


Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 16.01.2017

Podpis: 

Poděkování

V první řadě bych chtěl poděkovat vedoucímu své diplomové práce, panu Ing. Petru Zelenému, Ph.D., za trpělivé a odborné vedení a tím i katedře KSA, především za spoluúčast na financování a výrobě 3D tištěného prototypu. Dále kolegům z týmu Student Formula TUL, kteří pomohli se zajištěním a financováním výroby frézovaného prototypu. Veliký dík si zaslouží také pan doc. Ing. Jiří Vejvoda, CSc., který mi nabídl možnost provést MKP analýzy a TO v zázemí firmy Benteler ČR, s.r.o. a spolu se svým týmem výpočtářů z oddělení Chassis Design mi poskytli cenné rady, nejen v této oblasti mé diplomové práce. Opomenout nemohu ani pana Miroslava Krejčíka, který mi ve své firmě MSV Systems CZ s.r.o. zajistil rychlou, a především bezplatnou výrobu testovacích přípravků a některých dílů těhlice. Zmínit musím také pány Ing. Michala Ackermanna a doc. Ing. Pavla Solfronka, Ph.D., kteří mi byli nápomocni při testování prototypů na trhačce. A nakonec chci poděkovat hlavně mé rodině a přátelům za morální podporu nejen, při realizaci této diplomové práce, ale i celém předchozím průběhu studia.

Téma: Ověření mechanických vlastností optimalizovaného
dílu vyrobeného pomocí 3D tisku

Abstrakt:

Práce se zabývá konstrukčním návrhem dvou prototypů levé zadní těhlice vozu Formula SAE, za použití softwarových nástrojů pro modelování (CAD), výpočetní analýzu (CAE) a topologickou optimalizaci (TO). Popisuje výrobu obou prototypů, prvního konvenční technologií frézování, druhého technologií 3D tisku, metodou SLM. Dále obsahuje návrh principu nedestruktivních testů na trhačce, přípravků, popis testování prototypů a shrnutí výsledků, ze kterých plyne, že prototyp vyrobený pomocí 3D tisku dosahuje lepších mechanických parametrů, vykoupených několikanásobně vyšší výrobní cenou.

Klíčová slova: SLM, FSAE, frézování, těhlice, 3D tisk, topologická optimalizace, metoda konečných prvků

Theme: Mechanical properties verification of optimized part
produced by 3D printing

Abstract:

The thesis is concerned with the design of two prototypes of a left rear steering knuckle for Formula SAE car, with the application of software tools for modelling (CAD), computational analysis (CAE) and topology optimization (TO). It describes the methods of manufacture of both prototypes. The first one by conventional milling, and the second one by 3D printing utilizing the SLM method. It also contains the creation of principle of non-destructive tests using a tensile testing machine, jigs, description of prototype tests and summary of results. The results show that the 3D printed prototype has better mechanical properties at the cost of few times higher manufacturing price.

Keywords: SLM, FSAE, milling, steering knuckle, 3D printing, topology optimization, finite element method

Obsah

1	Úvod.....	11
2	Cíle práce	12
3	Projekt FSAE	13
3.1	Statické disciplíny	13
3.2	Dynamické disciplíny.....	15
4	Hlava kolového ložiska.....	17
4.1	Automobilové těhlice	17
4.1.1	Těhlice lichoběžníkové nápravy	17
4.1.2	Těhlice víceprvkové nápravy.....	18
4.1.3	Těhlice nápravy McPherson	19
4.2	Formulové těhlice.....	20
4.2.1	Těhlice vozu Formule 1	20
4.2.2	Těhlice vozu Formula SAE.....	21
5	Technologie Rapid Prototyping	24
5.1	Základní procesy	24
5.2	Aplikace v průmyslu	25
5.3	Práškové metody 3D tisku	27
5.3.1	Selective Laser Sintering	28
5.3.2	Selective Laser Melting	29
6	Analýza a optimalizace strojních součástí	31
6.1	Teorie pružnosti	32
6.1.1	Napětíová analýza	32
6.1.2	Základní úlohy	34
6.1.3	Metody řešení	35

6.2	Druhy výpočtových analýz a optimalizací	35
6.2.1	Lineární statická analýza	36
6.2.2	Topologická optimalizace	37
7	Zatížení těhlice	39
7.1	Rozložení hmotnosti vozu	39
7.2	Průjezd zatáčkou při konstantní rychlosti	41
7.3	Prudká akcelerace	43
7.4	Prudké brždění	45
7.5	Přejezd nerovnosti při konstantní rychlosti	49
7.6	Shrnutí	51
8	Návrh modelů těhlice	52
8.1	Návrh sestavy uložení kola	52
8.2	Model č.1 – výroba frézováním	53
8.2.1	Varianta č.1	53
8.2.2	Výpočtová analýza var. č.1	54
8.2.3	Varianta č.2	56
8.2.4	Výpočtová analýza var. č.2	56
8.2.5	Porovnání navržených variant	57
8.3	Model č.2 – výroba 3D tiskem	57
8.3.1	Topologická optimalizace	58
8.3.2	Výpočtová analýza optimalizovaného tvaru	61
8.4	Shrnutí	61
9	Výroba prototypů	63
9.1	Výroba metodou SLM	63
9.2	Výroba frézováním	66
10	Testování mechanických vlastností	67

10.1	Princip testování	67
10.2	Průběh testování	68
10.3	Výsledky testů	71
11	Zhodnocení prototypů a výrobních technologií	73
12	Závěr	75

Seznam použitých zkratk a symbolů

CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
DP	Diplomová práce
E	Modul pružnosti v tahu
F1	Formule 1
F_B	Brzdná síla
F_G	Tíhová síla
F_{NLZ}	Normálová síla na LZ kolo
F_{OD}	Odstředivá síla
F_S	Setrvačná síla
FSAE	Formula SAE
F_{TLZ}	Tečná síla na LZ kolo
F_{UT}	Síla do úchyty brzdového třmene
F_{XT}	Síla na těhlici v ose X
F_{YT}	Síla na těhlici v ose Y
F_{ZT}	Síla na těhlici v ose Z
G	Modul pružnosti ve smyku
k_f	Tuhost frézované těhlice
k_t	Tuhost těhlic 3D tisku
LZ	Levé zadní (kolo)
M_B	Brzdný moment
MKP	Metoda konečných prvků
M_M	Kroutící moment od motoru (na zadní nápravě)
M_{XT}	Ohybový moment na těhlici kolem osy X

M_{ZT}	Ohybový moment na těhlici kolem osy Z
O.P.	Okrajové podmínky
RM	Rapid Manufacturing
RP	Rapid Prototyping
SAE	Society of Automotive Engineers
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
SS	Souřadný systém
T	Těžiště vozidla
TO	Topologická optimalizace
ε	Tenzor deformace
μ	Poissonova konstanta
σ	Tenzor napětí

1 Úvod

Při volbě tématu pro svoji diplomovou práci (DP) jsem bral v úvahu, že katedra Výrobních systémů a automatizace, na které studuji, se z velké míry zabývá různými formami Rapid Prototypingu (RP). Proto se mi jako nejvhodnější jevil vybrat si téma, zabývající se právě tímto odvětvím. Aby však výstupem z mé práce nebylo jen několik vzorků odsouzených k věčnému zapomnění někde ve skladu, rozhodl jsem se, že spojím příjemné s užitečným a téma zaměřené na výzkum v oblasti RP aplikuji rovnou na reálně použitelný dílec, konkrétně na těhlici vozu Formula SAE (FSAE), na kterém už v době zadání této DP pracovalo několik mých kamarádů.

FSAE je mezinárodní projekt, určený pro studenty Vysokých škol, v různých oborech, od technických až po humanitní a ekonomické. Cílem je návrh, vývoj a reálná stavba vozu formulového typu, se kterým se pak jednotlivé týmy budou účastnit mezinárodních soutěží. Více uvedu v rešeršní části, tomuto projektu přímo věnované.

V zadání mé práce je zmíněn na návrh přední těhlice vozu FSAE, nicméně než jsem se dostal k vlastnímu řešení konstrukce těhlice, jiný kolega z týmu už se konstrukcí přední těhlice začal zabývat přede mnou. Proto jsem se po domluvě s vedoucím své práce rozhodl zaměřit na návrh těhlice zadní.

V první části této práce provedu rešerši jednotlivých témat, která s prací souvisí. Zaměřím se na projekt FSAE, dále na typy náprav používaných u běžných vozů a vozů formulových, poté provedu základní rešerši o technologii RP s bližším zaměřením na technologii 3D tisku a metodu SLM a nakonec podobným způsobem proberu i téma výpočetních metod konečných prvků (MKP) a topologické optimalizace (TO).

Dále se budu zabývat samotným návrhem, optimalizací a výrobou jednotlivých prototypů a budu zde uvádět všechny poznatky a zkušenosti, které z toho plynou. Nakonec provedu návrh testovacího zařízení, popř. přípravku pro otestování mechanických vlastností jednotlivých prototypů, a pokud mi to čas dovolí, tak i jeho výrobu a reálné testy.

Poslední část bude zaměřena na výše zmíněné porovnání obou prototypů a zhodnocení vhodnosti aplikace metody SLM pro výrobu prototypových dílů sportovních vozů.. Vhodnější z obou těhlic bude poté reálně použita na vozidle našeho domácího týmu studentské formule.

2 Cíle práce

Cílem této práce je především návrh dvou prototypů zadní těhlice pro vůz FSAE. Při návrhu obou modelů, bude použito softwarových nástrojů MKP a TO. Nicméně u jednoho z modelů bude brán ohled na vyrobitelnost za pomoci konvenční metody frézováním, kde tvar musí být jednodušší, zatímco u druhého modelu bude možné využít optimalizační software a navrhnout model tak, aby materiál byl opravdu jen v místech přenosu napětí a zatížení. Druhý model bude vyráběn za pomoci 3D tisku, což je technologie, umožňující vyrábět komponenty prakticky libovolného tvaru. Na prototypech budou provedeny zá-
těžové nedestruktivní testy, za účelem zjištění reálné tuhosti obou dílů. Na základě vý-
sledků testů, spolu s dalšími hledisky, jako jsou např. náklady na výrobu, výrobní časy,
atd., bude poté provedeno porovnání technologie SLM s technologií frézování. Závěrem
pak bude vyhodnocení, zda se technologie SLM hodí pro přímou výrobu součástí, jako je
například těhlice vozu formulového typu.

3 Projekt FSAE

Projekt FSAE® založil roku 1980 pan Ron Matthews se svými společníky z University of Texas. Základní myšlenkou tohoto projektu je zformovat tým vysokoškolských studentů, kteří mají za úkol vymyslet, navrhnout, vyrobit a dále vyvíjet malý vůz formulového typu, se kterým se poté účastní soutěží s ostatními týmy z celého světa (viz obr. 3.1), přičemž vůz může být osazen jakýmkoli čtyř-válcovým motorem a jediným omezením je sání škrcené na 1“ (25,4 mm). Postupem času se také zavedla možnost použití i jiných, než čtyř-válcových motorů a také elektromotorů. [1]

Díky soutěžím mají týmy možnost prokázat jejich kreativitu a konstrukční schopnosti. Soutěž obsahuje řadu disciplín, které by se daly shrnout do dvou kategorií: disciplíny statické a dynamické. Většina z nich je bodově ohodnocena a celkové vítězství získává tým s nejvíce body. [1]



Obr. 3.1: Formula Student Germany 2014 [2]

3.1 Statické disciplíny

Statické disciplíny se dělí do čtyř kategorií: Technical Inspection, Cost and manufacturing, Presentation a Design. Ve většině z nich jde zejména o ověření, zda je daný vůz způsobilý k bezpečnému plnění ostrých závodních disciplín, prověřují marketingové taktiky týmu a hodnotí tým jako funkční celek. [1]

Technical Inspection (viz obr. 3.3), je nebodovaná disciplína, která prověřuje, zda vůz splňuje všechny zásady a omezení stanovené pravidly. Prověřuje se funkčnost nejpod-

statnějších částí vozidla, jako je brzdový systém, pevnost karoserie, stav pneumatik, výstroj pilota apod. Při zjištění závad, je závodnímu týmu umožněno jejich odstranění, napravení a následné opakování přejímky. Pokud je vše v pořádku, vůz dostane validační štítek (viz obr.3.2) a je připuštěn k plnění dalších disciplín. [1]



Obr. 3.3: Technická přejímka [2]



Tab. 3.2: Validační nálepky [2]

Cost and manufacturing je bodovaná disciplína, jejímž hlavním účelem je naučit členy týmu, že náklady a rozpočet jsou důležité faktory, na které musí být brán ohled, v každém strojírenském projektu. Nejprve je utvořena zpráva o nákladech, která musí být zaslána rozhodčím disciplíny, ještě před jejím konáním. V průběhu konání disciplíny se tým musí zúčastnit diskuze s rozhodčím vedené u závodního vozu, čímž prokáží schopnost vytvořit přesný odhad nákladů na výrobu. Nakonec je tým podroben zkoušce v podobně reálného případu, pro který musí provést vyčíslení nákladů. [1]

Presentation je bodovaná disciplína, ve které tým prezentuje svůj produkt (studentskou formuli) rozhodčím, kteří figuruji jako fiktivní zástupci firem. Během své desetiminutové prezentace musí členové týmu co nejlépe přesvědčit rozhodčí, že jejich vůz je vhodným strojem, pro účast na víkendových amatérských závodech malých sportovních vozů, dokáží ho efektivně produkovat a produkce bude přinášet smysluplný výnos. Po prezentaci následuje pětiminutová část otázek a odpovědí. [1]

Design je bodovaná disciplína, ve které jde o zhodnocení celkového návrhu a stavby vozu. Přihlíženo je ke skutečnostem, zda je ke stavbě použito dílu kupovaných, či dílů vyvinutých závodním týmem. Jinak jsou např. hodnoceny tlumiče vyvinuté týmem, oproti tlumičům nakoupeným. Ke splnění disciplíny je nutné odevzdat dokumenty Design Report

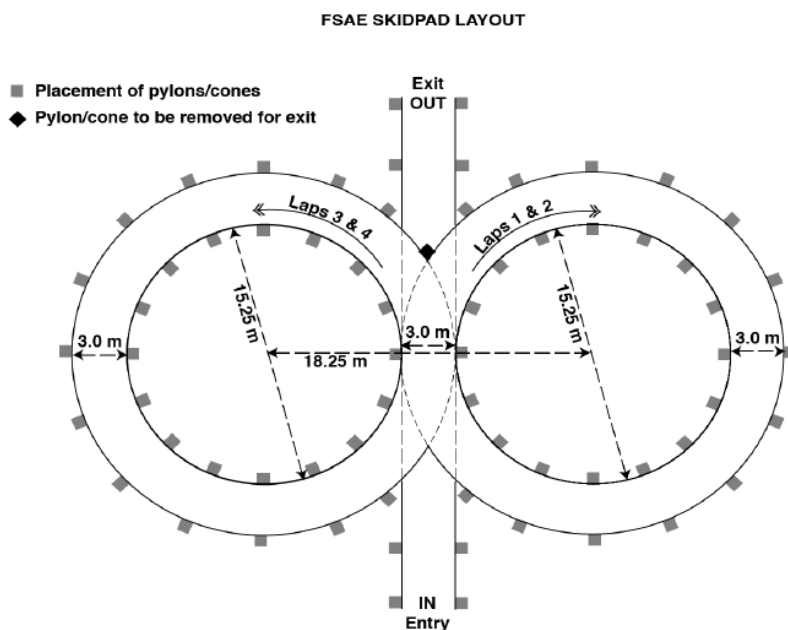
a Design Spec Sheet, které obsahují slovní popis návrhu vozu, technickou dokumentaci, atd. [1]

3.2 Dynamické disciplíny

Dynamické disciplíny už jsou čistě závodní. Zahrnují: „Acceleration, Skid Pad, Autocross a Endurance and Efficiency“. Jízdy se konají i za špatného počasí, proto tým musí mít minimálně jednu sadu „suchých“ a jednu sadu „mokrých“ pneumatik. [1]

Acceleration je bodovaná disciplína, která hodnotí schopnost akcelerace vozu v přímém směru na rovné dráze, která je 75 m dlouhá. Obsahuje dvě rozjížděky, přičemž každá má dva pokusy. Druhý pokus může jezdec využít neprodleně po první v rámci jedné rozjížděky. Jeden řidič může absolvovat jednu rozjížděku a dva pokusy. Nejlepší časy se v současnosti pohybují okolo 4 sekund. [1]

Autocross je bodovaná disciplína, spojující možnost otestování ovladatelnosti vozu a jeho manévrovacích schopností hned v několika směrech, zejména co se týče akcelerace, brždění, zatáčení a jejich kombinace. Trať bývá 1/2 míle dlouhá, může být tvořena i jako okruh, nicméně, není kontinuálně průjezdná. Start a cíl je vždy na jiném místě. Měří se čas, za který jezdec trať projede. Jedou se dvě rozjížděky, každá rozjížděka má dva pokusy a každá rozjížděka musí být absolvována jiným jezdce. [1]



Obr. 3.4: Trať disciplíny Skid Pad [1]

Skid Pad je bodovaná disciplína, ve které se hodnotí schopnost vozu projíždět konstantní zatáčkou při vysoké rychlosti bez ztráty přilnavosti. Obsahuje dvě rozjížděky a každá rozjížděka má dva pokusy. Trať má tvar dvou kruhů (viz obr.3.4), přičemž každý z kruhů je nutno dvakrát obkroužit. Měří se čas na objetí jednoho kruhu a nejlepší časy se v současnosti pohybují okolo 5 sekund. [1]

Endurance je bodovaná disciplína, jenž má za úkol otestovat hlavně schopnost vozu odolávat náročným závodním podmínkám, které soustavně působí delší dobu. Jede se za účasti více vozů na uzavřené trati, ale není zde dovolen žádný přímý kontakt vozů (viz obr. 3.5). Rozjížděka má 22 km, přičemž jeden jezdec odjede 11 km a poté ho v depu vystřídá druhý, který dokončí druhou půli závodu. Měří se čas na každé kolo. Maximální rychlost se pohybuje okolo 105 km/h. [1]

Efficiency je bodovaná disciplína, hodnotící spotřebu paliva (u elektrických vozů energie) spotřebovaného během disciplíny endurance v závislosti na čase jejího plnění. [1]



Obr. 3.5: Disciplína Endurance [2]

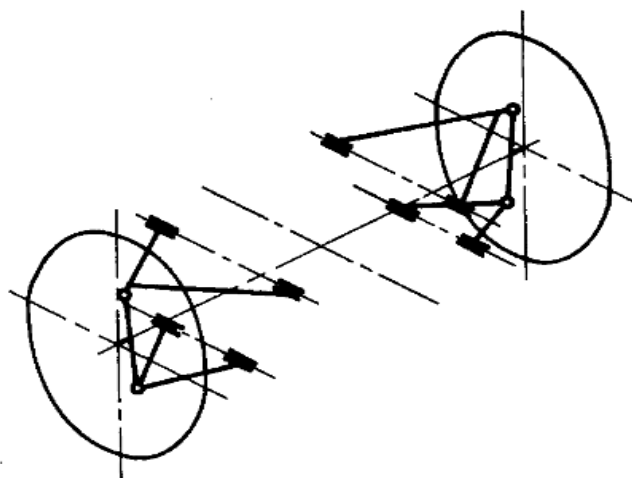
4 Hlava kolového ložiska

Hlava kolového ložiska, označována též jako těhlice, je jeden z dílů podvozku vozu, který představuje propojení mezi otáčejícím se kolem a jeho zavěšením. Kolo je v těhlici uloženo nejčastěji pomocí valivých ložisek. Vzhledem k tomu, že je třeba zachytávat i axiální síly, používají se nejčastěji kuličková ložiska s kosoúhlým stykem, případně ložiska kuželíková (zejména u nákladních automobilů). Čepy zavěšení (horního ramena, spodního ramena, rejdového čepu) bývají často uloženy pomocí kulových kloubů. [3]

4.1 Automobilové těhlice

4.1.1 Těhlice lichoběžníkové nápravy

Lichoběžníková náprava je tvořená dvojicí nad sebou umístěných příčných ramen, která mají obvykle tvar trojúhelníku (viz obr. 4.1). Název lichoběžníková pochází z faktu, že koncové body ramen při průmětu do svislé, příčné roviny (pohled zepředu) tvoří lichoběžník. Horní rameno bývá většinou o něco kratší než spodní. Jednak z důvodu potřeby více prostoru pro motor a také z důvodu kinematiky při pružení. Kolo se totiž poté při propnutí otáčí kolem tzv. středu klopení a díky jeho vhodnému umístění je možné dosáhnout jen velmi malých změn v odklonu a rozchodu kol při pružení. Lichoběžníková náprava také díky možnosti montáže ramen pod úhlem nabízí snadnou možnost regulace tzv. středu klonění, jehož výskyt se požaduje ve výšce těžiště vozidla, aby nedocházelo k předklánění, popř. zaklánění vozu při brždění, popř. rozjezdu. [3]



Obr. 4.1: Schéma lichoběžníkové nápravy [3]

Těhlice u tohoto typu zavěšení je tedy pomocí vazeb, nejčastěji kulových kloubů, spojena se spodním a horním ramenem. Vedení v podélném směru (popř. zatačení) je zajištěno třetím kulovým kloubem, jímž je těhlice spojena s řídicí tyčí. Tyto tři body určují typický tvar těhlice, používané u lichoběžníkového zavěšení (viz obr. 4.2). [3]

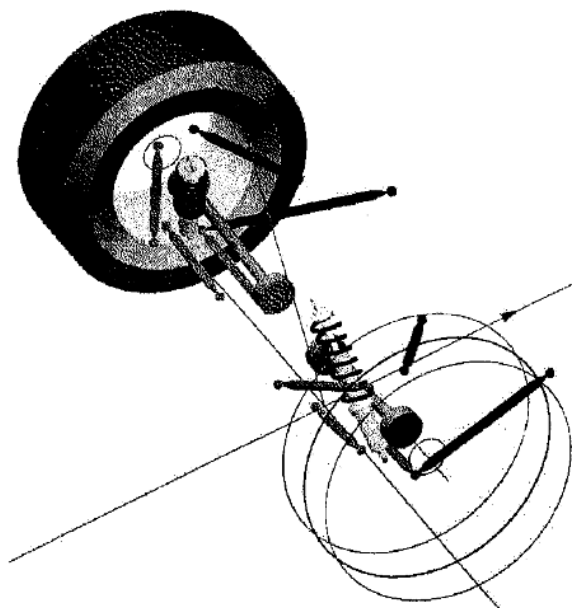


Obr. 4.2: Přední těhlice vozu Ferrari F430 [4]

4.1.2 Těhlice víceprvkové nápravy

Víceprvková náprava je poněkud dražším řešením systému zavěšení kol, avšak v porovnání s ostatními systémy je v dnešní době nejlepším řešením, co se týče splnění dynamických požadavků na přesné vedení kola. Z názvu je patrné, že se skládá z několika prvků – ramen, které svým uspořádáním zajišťují uchycení kola v podélném a příčném směru a ve vertikálním směru umožňují pružení (viz obr. 4.3). Na rozdíl od lichoběžníkové nápravy, u těchto systémů neexistuje jednotný princip uspořádání, který by se jednotně používal napříč spektrem různých výrobců automobilů. Co výrobce, to v podstatě originál. Firma Volkswagen např. vyvinula čtyřprvkové zavěšení, které vyniká perfektní kinematikou, díky tomu, že odděluje příčné a podélné silové působení, působící od kola do struktury vozu. Firma Mercedes-Benz zase používá pětprvkové uspořádání, které má tu výhodu, že lze použít pro levou, tak i pravou stranu vozidla. [3]

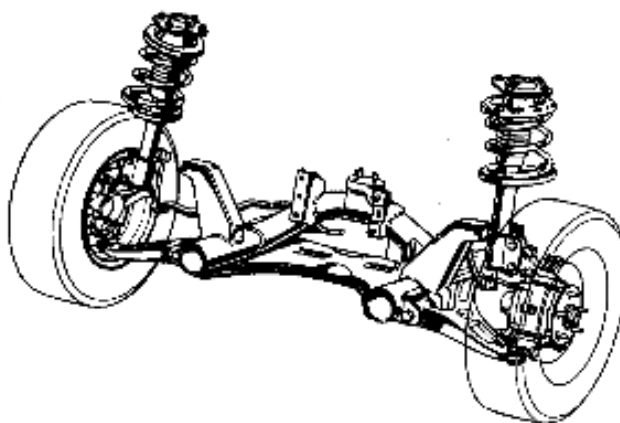
Těhlice u víceprvkových náprav tedy nemají typizovaný tvar. Jsou konstrukčně náročné a jejich tvar závisí zejména na počtu úchopných bodů pro jednotlivá ramena, způsobu uložení pružiny, zda-li se jedná o poháněnou nápravu či nikoli, atd. [3]



Obr. 4.3: Schéma víceprvkové nápravy [3]

4.1.3 Těhlice nápravy McPherson

Náprava McPherson je u moderních automobilů asi nejpoužívanějším způsobem řešení zavěšení kol. Ve své podstatě vychází z lichoběžníkové nápravy, horní rameno je však nahrazeno posuvným vedením ve formě teleskopu, který zároveň slouží (ve většině případů) jako hydraulický tlumič (viz obr. 4.4). Teleskop ovinuje šroubovitá tlačná pružina, která zajišťuje funkci odpružení. Díky tomuto uspořádání je ve srovnání s lichoběžníkovou nápravou možné uspořít více místa, ať už pro motor nebo zavazadlový prostor. [3]



Obr. 4.4: Přední náprava automobilu Mazda Premacy [3]

Zavěšení typu McPherson se používá jak u přední, tak u zadní nápravy, poháněné i nepoháněné. U přední nápravy je osa teleskopu zároveň osou natáčení kola (osou rejdového čepu), proto horní uložení teleskopu musí být otočné. To lze zajistit například použitím axiálního ložiska. U zadní nápravy tato nutnost odpadá a je tedy celkově konstrukčně jednodušší. Zároveň se zde také používá delší podélné rameno, což má za následek menší změny ve sbíhavosti při propružení. [3]

Těhlice používané u náprav McPherson mají podobně jako u lichoběžníkových náprav typické konstrukční zásady. Nejpatrnější z nich je ta, že těhlice musí obsahovat třmen (oko) pro uchycení teleskopu v jeho spodní části (viz obr. 4.5). Tento třmen musí být vhodně konstrukčně vyřešen, aby pod ním byl prostor pro poloosu pohánějící kolo, ale zároveň aby byl dostatečně tuhý a pevný. Dalšími typickými prvky těhlice jsou úchyty pro kulové čepy, zajišťující spojení se spodním ramenem a řídicí tyčí. [3]



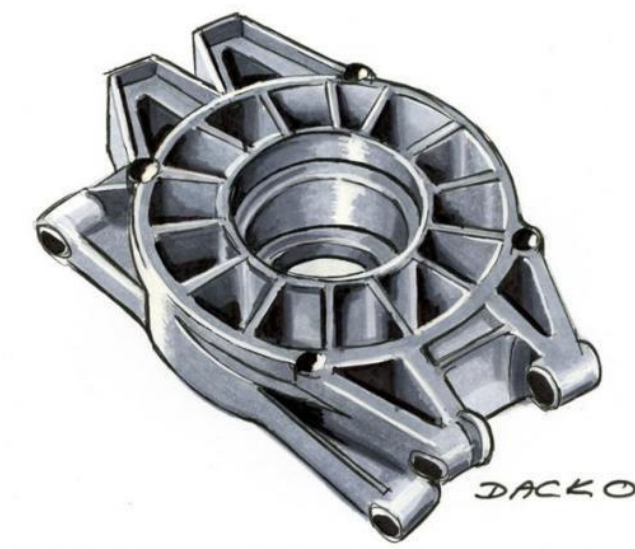
Obr. 4.5: Přední těhlice vozu Škoda Fabia [5]

4.2 Formulové těhlice

4.2.1 Těhlice vozu Formule 1

Vůz Formule 1 (F1) má jak u přední, tak u zadní nápravy použito zavěšení lichoběžníkového typu, které je tvořeno na každé straně umístěnými dvojicemi horního a spodního trojúhelníkového ramena. Těhlice, je proto uchycena na zavěšení pomocí tří bodů, kulových kloubů. Svým principem, jsou si přední i zadní těhlice velmi podobné. Středová část, nesoucí ložiska, je s vnější částí, nesoucí úchyty pro čepy ramen, popř. tyče řízení,

spojena soustavou žeber (viz obr. 4.6). Tím je zajištěna vysoká pevnost a tuhost při dosažení nízké hmotnosti a přidanou hodnotou je navíc možnost proudění vzduchu mezi žebry až k brzdovému kotouči a tím jeho dobré chlazení. Samotná hmotnost těhlice je pro vůz velmi důležitým faktorem a má veliký vliv na výsledné chování vozu. Jedná se totiž o neodpruženou hmotu, která výrazně ovlivňuje schopnost reakce podvozku při najetí na nerovnost. Z tohoto důvodu se těhlice vozu F1 vyrábějí z materiálů, jako je například titan. [6]



Obr. 4.6: Těhlice vozu Formule 1 [6]

4.2.2 Těhlice vozu Formula SAE

Při konstrukci těhlice vozu FSAE se dá v podstatě vycházet z podobných principů jako u vozu F1. Také se zde používá výhradně lichoběžníkové zavěšení a jsou zde nároky na co nejvyšší tuhost v kombinaci s nízkou hmotností, vzhledem k tomu, že se jedná o neodpruženou hmotu. Nicméně vše je poněkud jednodušší, protože studentská formule je řádově o více než polovinu lehčí než vůz F1 a ani zdaleka nedosahuje tak vysokých výkonů, jako její „dospělejší“ sourozenec. [7]

Možnost inspirace a experimentování při návrhu těhlic pro vozy FSAE je poměrně velká. Jednak je zde od organizátorů kladen veliký důraz na kreativitu studentů, takže samotnou konstrukci omezuje jen několik základních pravidel a zadruhé komunita vysokoškolských studentů je pořád ještě dosti myšlenkově otevřená, na rozdíl od tvrdého konkurenčního boje ve světě reálného závodění. Celkově by se způsob návrhu těhlic pro studentskou formuli dal rozdělit podle technologií a materiálů, použitých na jejich výrobu. [7]

Svařované těhlice (viz obr. 4.8) mají výhodu v možnosti získání duté, velmi tuhé a zároveň lehké konstrukce, proto se u vozů FSAE stále hojně používají. Nicméně jsou poněkud náročnější na výrobu. Musí se dbát na to, aby svary byly dostatečně kvalitní, nebyly v místech koncentrace napětí a nebyly namáhány smykem. Také se zde vyskytuje problém s deformací při svařování vlivem tepelné roztažnosti materiálu a tím složitější zachování přesných rozměrů. Také volba materiálu je náročná. Ocel je například dobře svařitelná, ale najít takový druh ocelové slitiny, která bude zároveň s tím, ještě velmi lehká už může být složité. Proto se jako alternativa nabízí použití hliníkových slitin, jenže ty jsou zase obtížněji svařitelné. I tak ale tuto technologii výroby některé týmy stále používají. [7]



Obr. 4.8: Svařovaná těhlice FSAE [7]



Obr. 4.7: Těhlice FSAE odlévaná ze slitiny hliníku [7]

Dalším možným způsobem výroby těhlic, je odlévání do pískových forem. Výhodou odlévaných těhlic (viz obr. 4.7) je možnost dosažení složitějšího a z hlediska pevnosti optimálnějšího tvaru. Odlévání se však obecně používá hlavně u sériové výroby, protože příprava formy je náročná a drahá, proto se formu vyplatí používat opakovaně. Na aplikaci v projektu studentské formule, kde je potřeba jen několik málo kusů se tudíž příliš nehodí. [7]

Nevýhodou jsou také nepříliš kvalitní materiály určené pro odlévání do pískových forem a také nutnost obrábění funkčních ploch těhlice po odlití. I přesto se však odlévané těhlice na vozech FSAE najdou. [7]

Asi nejrozšířenějším způsobem výroby těhlic na studentských formulích je obrábění. (viz obr. 4.10). Výhodou je možnost použití v podstatě jakéhokoliv materiálu. Nejčastěji se používají hliníkové slitiny s velmi dobrými mechanickými vlastnostmi. Dále pak kvalitní

ocelové a titanové slitiny. Obráběné těhlice jsou většinou charakteristické svým tvarem. Je u nich typické, že jsou nejširší v místě, kde jsou uložena ložiska a směrem k uložení kulových kloubů se postupně zužují. Zároveň jsou v tomto místě žebrované. Díky tomu je dosažena nižší hmotnost. Návrh obráběné těhlice je vždy velkým kompromisem mezi optimálním tvarem a cenou výroby. Teoreticky by bylo možné vyrobít, tak složitý tvar, kdy bude odebráno veškeré množství nepotřebného materiálu a materiál bude zachován jen v místech nezbytných pro přenos napětí. Takového tvaru lze docílit například optimalizací pomocí MKP. Reálná výroba takové součásti by však byla nesmírně drahá, ať už z pohledu spotřebovaného materiálu, nebo délky a složitosti výroby. [7]



Obr. 4.10: Obráběné těhlice [7]



Obr. 4.9: Těhlice z 3D tisku [7]

Nejnovější technologií, na výrobu těhlic vozu FSAE je technologie RP. Tato technologie označovaná také jako 3D tisk nespadá do skupiny konvenčních metod výroby, jako jsou např. již zmíněné obrábění, svařování a odlévání, pro výrobu součástí na studentské formule má však veliký potenciál. Jednak proto, že stroje pracující s technologií RP (tzv. 3D tiskárny) jsou velmi často právě na univerzitách a za druhé proto, že je zde možnost dosažení prakticky jakkoliv složitého tvaru (viz obr. 4.9). Díky tomu je při návrhu možné využít např. metodu TO, při které konstruktér definuje tvar pouze základních funkčních ploch a vnější obálku dílu, a software pak sám navrhne pomocí principů MKP tvar tak, aby materiál byl pouze v místě, kde je to nezbytné. Nevýhodou může být, že po výrobě, je třeba funkční plochy dílu obrobít, podobně, jako tomu je u odlévání. Také je potřeba odstranit podpurný materiál, který je pro tisk dílu nezbytný. [7]

5 Technologie Rapid Prototyping

Pojem Rapid Prototyping by se dal definovat jako soubor metod, technologií a aplikací, které dnešním výrobním závodům pomáhají vyvíjet a produkovat jejich výrobky velmi efektivním způsobem, ať už z hlediska úspory času, či ceny. Konkrétněji řečeno, v rámci RP jde o zhotovení reálného tří-dimenzionálního dílu přímo z numerického modelu, kterým nejčastěji bývá CAD model. Tento proces je velmi rychlý a plně automatizovaný. Využívá se zde aditivního přístupu, kdy je model postupně „budován“ vrstvu po vrstvě a vyrobené díly jsou používány jako prototypy. Díky RP je možné získat takový prototyp v řádu hodin, místo dnů nebo týdnů, jako je tomu u konvenčních metod. Zjednodušeně se dnes technologie RP označuje jako tzv. 3D tisk. [8]

5.1 Základní procesy

K výrobě prototypu je možné využít různých materiálů. Často to bývá vosk, plast a kovy. Tyto materiály mají společné faktory, jako je jejich výchozí struktura, například ve formě:

- prášku
- tekutiny

a nebo metoda tvorby modelu:

- Stereolitography (STL)
- Fused Deposition Modeling (FDM)

Celkový proces výroby dílu se dá shrnout do následujících pěti kroků:

1. Tvorba CAD modelu požadovaného tvaru a rozměrů.
2. Převod CAD modelu do STL formátu, který byl zvolen jako jednotný formát pro RP technologii.
3. Nařezání STL modelu na 2D vrstvy o tloušťce 0,01 až 0,7 mm, v závislosti na požadované přesnosti dílu, či doby tisku.
4. Odeslání numerického modelu na tiskárnu a samotný tisk dílu.
5. Očištění dílu od podpůrného materiálu a finální úpravy – Postprocessing.

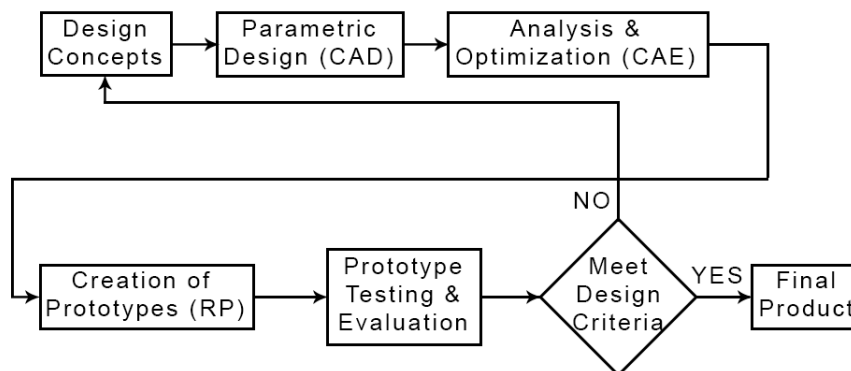
[8]

5.2 Aplikace v průmyslu

Jedna z hlavních aplikací RP se projevuje při vývoji nových výrobků. Jelikož dnešní průmyslový trh se neustále zrychluje a na výrobky jsou kladeny čím dál vyšší nároky, ať už z hlediska kvality nebo nízké ceny, je potřeba provádět návrh, testování a následné úpravy prototypu nového výrobku před jeho zavedením do výroby co možná nejefektivněji. A to umožňuje právě RP. [8]

Procesy, kterými produkt během vývoje prochází, se dá shrnout do kroků (viz obr. 5.1):

1. Tvorba designového konceptu.
2. Parametrický numerický model (CAD)
3. Výpočetní analýza a optimalizace s použitím MKP (CAE).
4. Výroba prototypu – tisk.
5. Testování prototypu.
6. Vyhodnocení testů a porovnání s požadovanými parametry.
7. Na základě vyhodnocení buď opakování procesů, nebo finální úprava prototypu.



Obr. 5.1: Blokové schéma procesů při vývoji dílu pomocí RP [8]

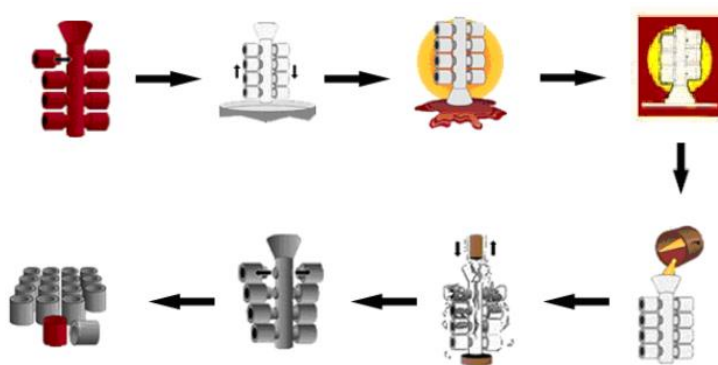
Další vhodnou aplikaci RP představuje tzv. Reverse Engineering (RE). Je to technologie tvorby CAD modelu, avšak opačnou cestou, než je běžné u konvenčních metod. V praxi se občas stane, že je potřeba vyrobit díl, který je naprosto shodný s jiným dílem, který je už vyrobený, ale pro opětovnou výrobu nemáme žádné podklady. Jde například o vytváření kopií historických konstrukcí, ručně vyrobených prototypů, částí těla v medicínské aplikaci apod. Pomocí RE můžeme dostat CAD model takového prvku relativně snadno a rychle. Slouží k tomu tzv. 3D skenování fyzického dílu (viz obr. 5.2), ze kterého zís-

káme plošný numerický model dílu a po jeho opravách (neoskenovaná místa jsou v modelu reprezentována jako díry) je možné převedení již na objemový CAD model a z něj je poté možno přímo vytvořit nový prototyp pomocí RP. [8]



Obr. 5.2: Skenování dílu 3D skenerem [9]

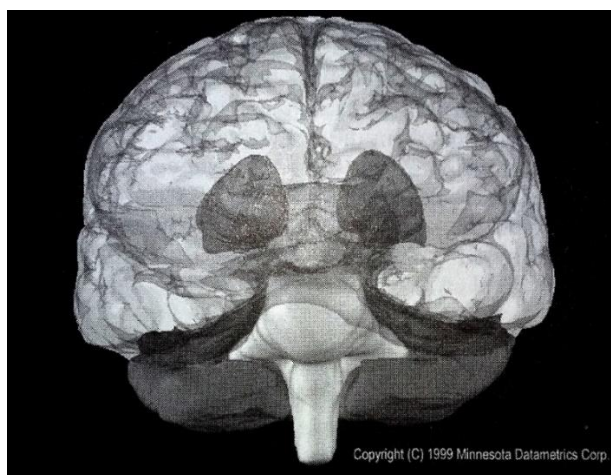
V současné době nejvhodnější aplikací RP se jeví využití při výrobě jader u technologie odlévání s vytavitelným modelem (viz obr. 5.3). Na 3D tiskárně je vytištěno voskové jádro, které má tvar a rozměry finálního výrobku, případně je vytištěna rovnou série několika desítek kusů takovýchto jader, které jsou vzájemně spojeny do tzv. stromčeků. Jádro je následně obaleno směsí pojiva a keramických prášků, čímž se vytvoří skořepinová forma. Ta je poté vytvrzena v peci, kde zároveň dojde i k vytavení voskového modelu. Do formy se pak nalije finální roztavený materiál. Po jeho ztuhnutí je forma rozbita, čímž získáme hotový díl, který je nakonec ještě nutné očistit. Tato technologie se používá zejména při výrobě malých dílů, jako jsou šperky, bižuterie, zubní náhrady atd. V kombinaci s RP je však vysoce produktivní. [8]



Obr. 5.3: Sled operací při odlévání s vytavitelným modelem [10]

Za budoucnost rozvoje metod RP se dá považovat tzv. Rapid Manufacturing (RM), což je odvětví, kde se namísto prototypů vyrábějí již hotové výrobky. Nicméně požadavky na přesnost 3D tiskáren a prozatím omezená použitelnost různých materiálů jsou velikými překážkami, pro jejichž překonání je stále nutný rozsáhlý vývoj RP. V dnešní době se RM používá v leteckém průmyslu. Např. firma Boeing ve své divizi, zabývající se vesmírnou technikou úspěšně vyrábí některé díly pro mezinárodní vesmírnou stanici (ISS) metodou RM. Dále jsou díly vyrobené RM používány např. u závodních speciálů F1. Pro tyto aplikace se používají převážně metody SLS a SLM. [8]

Neopomenutelnou je také aplikace RP v medicíně, kde je využitelná zejména pro výrobu medicínských přístrojů a nástrojů. Příkladem jsou svorky, skalpely, chirurgické šrouby atd. Dále jde o zobrazovací přístroje a nakonec také chirurgické implantáty a anatomické modely. Výroba modelů sice může být nákladná, nicméně tyto modely mohou velice významně přispět k plánování náročných operací a trénování přesných postupů, na kterých závisí úspěšnost operace a tím i lidský život. Podkladem pro tvorbu takového modelu mohou být např. snímky z magnetické rezonance (viz obr. 5.4), na základě kterých je sestaven CAD model. [8]



Obr. 5.4: Snímek mozku z magnetické rezonance [8]

5.3 Práškové metody 3D tisku

Práškových metod 3D tisku existuje celá řada. Některé pracují s Laserovým paprskem, jako například Selective Laser Sintering (SLS), Selective Laser Melting (SLM) a Direct Metal Laser Sintering (DMLS). Jiné zase s proudem elektronů, jako Electron Beam Melting (EBM). Já se v této části DP budu zabývat pouze stručným popisem metody SLM,

což je jedna z technologií, kterou bude předmět DP – zadní těhlice vozu FSAE – vyráběn. Dále také metodou SLS, která je z hlediska vývoje předchůdcem metody SLM. [11]

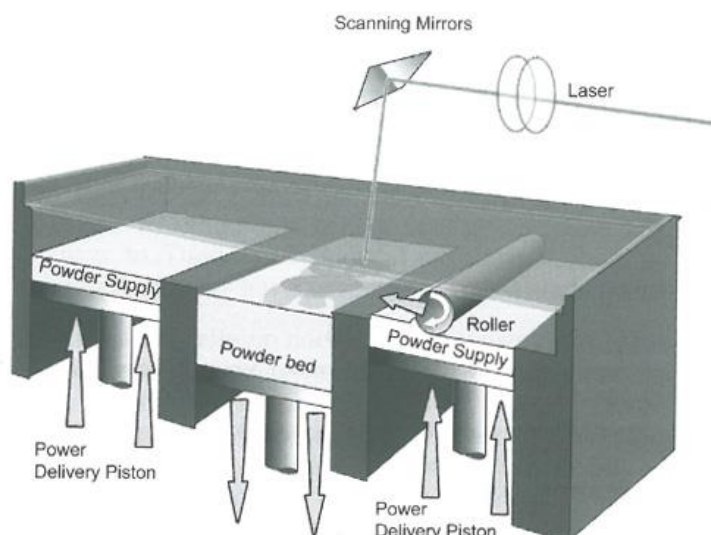
Materiálové vlastnosti a stabilita dílů, které je možno dosáhnout s procesy, založenými na výchozím materiálu ve formě prášku, při dlouhodobějším výhledu znamenají větší vhodnost použití v oblasti RM, než metody založené na výchozím materiálu ve formě kapalné. Práškové metody rovněž nabízejí širší možnosti využití materiálů, jako např. polymery, kovové a keramické materiály, běžně dostupné na současném komerčním trhu. Díky tomu, že při výrobě dochází k nanášení prášku po vrstvách, objevuje se zde výhoda použití funkčně odstupňovaných materiálů. Ve výsledku pak celý díl není pouze z jednoho materiálu. To poskytuje unikátní potenciál pro zvýšení funkčnosti dílů vyrobených za pomoci RM. [11]

5.3.1 Selective Laser Sintering

Metoda SLS byla prvně vynalezena a patentována panem Rossem Householderem v roce 1979, ale v praxi byla využita až později, při práci pana Carla Deckarda, na University of Texas v Austinu koncem roku 1980. To vedlo ke vzniku firmy DTM Corporation, která v roce 1992 jako první uvedla na trh komerčně využitelný stroj a vyvinula technologii dovolující pracovat se širokou škálou materiálů od polymerů až po keramiku a kovy. V roce 1994 firma EOS GmgH vydala jejich stroj EOSINT, který si stále drží významnou pozici na trhu. [11]

Proces je v mnoha ohledech podobný metodě STL, ale prášek je spékán nebo taven laserem, který selektivně snímá komoru s práškem a vytváří tak pevný 2D tvar. Následně je nanесena vrstva nového prášku, obvykle 100 μm silná, takže nový profil může být laserem připečen k vrstvě spodní. Proces pokračuje, dokud nevytvoří celý 3D objekt a nena-tavený prášek slouží jako podpůrný materiál, který odbourává potřebu odstraňování podpůrného materiálu během post-procesingu (viz obr. 5.5). [11]

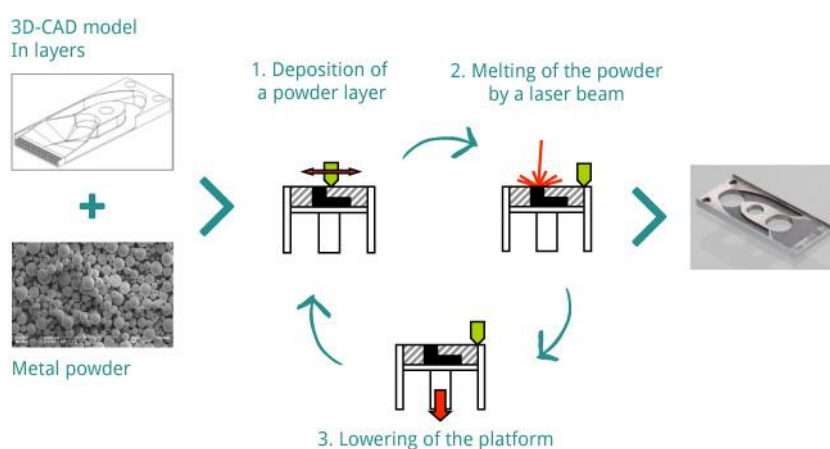
Během SLS procesu je komora s práškem ohřívána předtím než laser zvýší teplotu prášku na teplotu, která je typicky několik stupňů Celsia pod teplotou spékání. Toto předeřhřívání je obvykle tvořeno infračervenými zářiči a pomáhá v procesu redukovat teplotní spád mezi spečeným a nespečeným práškem a redukuje energii potřebnou pro spečení prášku laserem. [11]



Obr. 5.5: Schématické znázornění metody SLS [11]

Během roku 1990 obě firmy, DTM i EOS, vyvinuly SLS procesy umožňující výrobu komplexních jader a forem pro odlévání do pískových forem za použití pískových zrn potažených polymerním pojivem. Další různé pokusy byly zrealizovány u metody SLS pro spékání keramických prášků, ale prozatím nebyly plně komerčně využity. DTM také aplikovalo koncept používající povlakované prášky v oblasti spékání kovů. SLS stroj tak produkoval polotovary pro výrobu součástí práškovou metalurgií. Tyto polotovary poté byly umístěny do pece, kde došlo k vypálení pojiva, spečení k zrn a nakonec nasycení poroidních součástí bronzem. Tento proces se zaměřoval hlavně na výrobu řezných nástrojů, ale nabízel také určitý potenciál pro využití v RM koncových produktů. [11]

5.3.2 Selective Laser Melting



Obr. 5.6: Princip metody SLM [12]

Princip metody SLM (viz obr. 5.6) je založen ne na pouhém spékání kovových prášků, ale na jejich plném tavení. Díky tomu lze získat strukturu výsledného materiálu velmi podobnou struktuře materiálu u odlévání. Tisk probíhá způsobem, kdy je nanесena tenká vrstva kovového prášku na podkladovou desku a následně je laserem po jednotlivých trajektoriích tavena plocha (tvaru řezu), potřebná pro postupné vytvoření finálního dílce. Zároveň je také budován podpůrný materiál, který je po dokončení nutné odstranit. Takto se proces vrstvu po vrstvě opakuje dokud není vystavěn finální tvar dílce. [11]

V dnešní době jsou komerčně dostupné SLM systémy variantami přístupu Selective Laser Powder Remelting (SLPR) vyvinutém společností Fraunhofer Institute for Laser Technology v Německu. Jejich výzkum vyvinul základní procesní techniky nezbytné pro úspěšné tavení kovů pomocí laseru. Fraunhofer využila Nd-YAG laser namísto CO₂ laseru používaného u metody SLS, což vedlo k o mnoho lepší absorptivitě kovových prášků. Následně se u téměř všech SLM strojů přešlo na vláknové lasery, které jsou celkově levnější, kompaktnější, energeticky efektivní a mají lepší kvalitu paprsku než Nd-YAG lasery. Dalšími klíči pro zvýšení efektivity metody SLM, bylo, v porovnání s SLS, použití jiného snímacího schématu laseru, f-theta čoček pro minimalizaci zkreslení paprsku během snímání a ochranné atmosféry s nízkým obsahem kyslíku. [11]

Jedním společným rysem mezi výrobci SLM strojů je pevná vazba tisknutých dílců se základnou platformy. Tento postup zabraňuje zkroucení dílců kvůli zbytkovým napětím. To znamená, že z hlediska designu, není flexibilita dílů vyrobených SLM tak široká jako flexibilita dílů vyrobených za použití laserem spékáných polymerů, kvůli potřebě odstranit podpůrný materiál pomocí obráběcích a řezných operací. [11]

Mezi zajímavosti patří např. stroj Realizer, vyvinutý firmou MCP Group, který využívá laser k plnému tavení prášků z nerezové oceli a využívá podobnou technologii jako je SLS. Tento proces je poměrně využitelný pro výrobu velmi malých komponent s komplexní mřížkovou strukturou. Firma Trumf zase uvedla stroj pro metodu SLM u kterého tvrdí, že na něm lze dosáhnout 100% hustoty materiálu vyráběných prvků. Vedle toho firma 3D Micromac AG vyvinula proces mikro-spékání pro výrobu kovových součástí o minimální velikosti až 20 μm za použití prášku s velikostí částecek v řádech μm, které jsou spékány laserem. [11]

6 Analýza a optimalizace strojních součástí

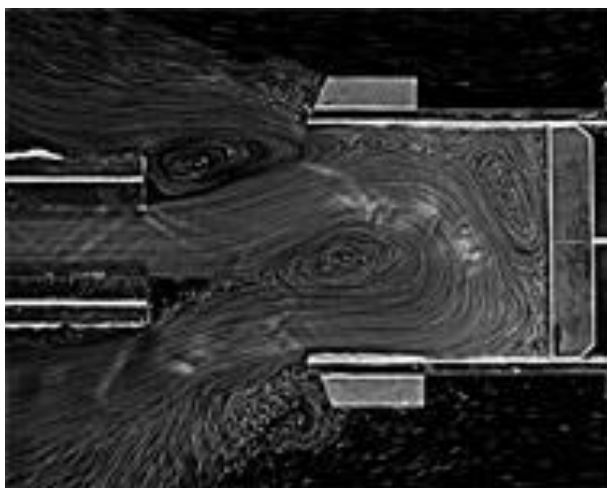
V technické praxi lze k návrhu strojních součástí a konstrukcí přistupovat dvěma způsoby:

- přímé řešení
- nepřímé řešení

V případě přímého řešení jde o návrh založený na odhadu, intuici a citu konstruktéra a významnou roli hraje hlavně jeho zkušenost. Takové řešení buď vede k cíli a dá se považovat za úspěšné, nebo k cíli nevede a je nutné pro řešení zvolit jinou metodu. V podstatě se jedná o řešení typu „pokus-omyl“. U nepřímého řešení, se namísto formulovaného problému nejprve řeší jiný, jednodušší problém. A teprve poté se, prostřednictvím jeho výsledku, přechází k řešení problému primárního. Při tomto experimentálním procesu se zkoumanému objektu, dle určitých kritérií, přiřazuje model, který může být:

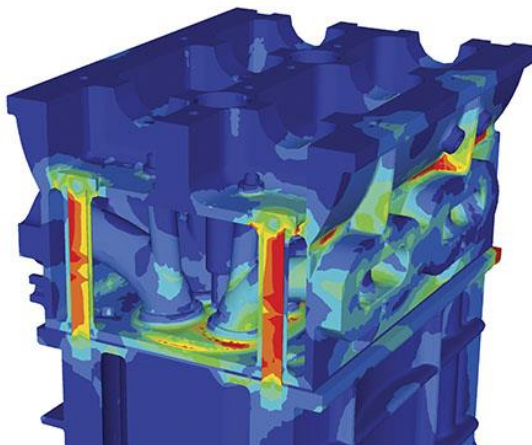
- fyzický
- abstraktní
- kombinovaný

Fyzický model (viz obr. 6.1) je vhodný např. při simulaci obtékání vzduchu kolem modelu auta, letadla, atd. v aerodynamickém tunelu, tzn. hodí se pro zkoumání dějů působících na originál, založených na fyzikální podstatě. [13]



Obr. 6.1: Simulace proudění pomocí obarvené vody a hliníkového prášku [14]

Abstraktní model (viz obr. 6.2) umožňuje zkoumat děje působící na originál pomocí matematického popisu jejich průběhů. Proto jsou tyto modely označovány také jako výpočtové.



Obr. 6.2: Numerická analýza skříně spalovacího motoru [15]

Výpočtové modely lze z hlediska linearit rovnice rozdělit na:

- modely lineární
- modely nelineární

Lineární modely jsou idealizované a podávají jednoznačné řešení. Jejich konečný stav závisí na vstupních hodnotách zadaných posuvů a zatížení, bez ohledu na to, jak bylo takového stavu dosaženo. Výsledek lze poměrně jednoduše získat složením dílčích úloh podle zákona superpozice. Ve srovnání s nelineární úlohou je jednodušší. Výsledek u nelineárních modelů je závislý na posloupnosti stavů, kterými model během děje prochází a pro řešení nelineárních úloh je zapotřebí mnohem více zkušeností. [13]

6.1 Teorie pružnosti

6.1.1 Napěťová analýza

Při návrhu strojních dílů je nejčastěji potřeba simulovat zatížení, které na díl působí v mezních stavech a následně v tomto dílu vyšetřit stavy napjatosti a deformace, které se poté porovnají s materiálovými hodnotami. Prostředkem k vyšetření stavů napjatosti a deformace je právě napěťová analýza.

Jejím principem je v tělese o určitém objemu a vnější ploše určit tři pole:

- vektorové pole posunutí
- tenzorové pole deformace
- tenzorové pole napětí

Vektor posuvů definuje posuvy v trojrozměrném kartézském systému pomocí tří funkcí souřadnic $u = u(x, y, z)$, $v = v(x, y, z)$, $w = w(x, y, z)$. Ve vektorové formě:

$$\{u\} = \{u, v, w\} \quad (6.1)$$

Tenzor napětí obecně popisuje napjatost elementárního objemu tělesa. Má devět složek – tři normálové složky napětí a šest složek smykových. Lze však využít zákona o sdruženosti smykových napětí a uvažovat tak pro tenzor napětí celkově pouze šest složek. Ve vektorovém zápisu vypadá takto:

$$\sigma = \{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}\}^T \quad (6.2)$$

Tenzor deformace vyjadřuje geometrické změny přetvořením elementárního objemu tělesa. Platí pro něj stejná pravidla jako pro tenzor napětí, proto lze zapsat ve tvaru:

$$\varepsilon = \{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}\}^T \quad (6.3)$$

Pro správné popsání deformace celého tělesa je nutné definovat také ještě geometrické, tzv. Cauchyho rovnice (platné pouze pro případ malých deformací), které vytvářejí vazbu mezi složkami posuvů a deformací. Mají tyto tvary:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} ; \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} ; \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (6.4)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} ; \gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} ; \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \quad (6.5)$$

Nakonec je nutné vědět ještě vztah mezi deformací a napjatostí. K tomu slouží fyzikální rovnice. Vyjadřují tzv. Hookeův zákon, který je platný pro izotropní a homogenní materiál, u kterého se při zatěžování pohybujeme v oblasti pružných deformací. Takový materiál lze pak popsat dvěma, resp. třemi konstantami: modulem pružnosti v tahu E , modulem pružnosti ve smyku G a Poissonovým číslem μ . [13]

Rovnice mají tyto tvary:

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} ; \gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G} ; \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G} \quad (6.6)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] ; \varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)] ; \varepsilon_z \\ &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] \end{aligned} \quad (6.7)$$

6.1.2 Základní úlohy

V teorii pružnosti lze řešit tři základní úlohy:

- přímá úloha
- inverzní úloha
- poloinverzní úloha

Úlohou, která se řeší nejčastěji, je úloha přímá a jde v ní právě o stanovení deformace a napjatosti tělesa, u kterého známe geometrii, materiál, zatížení a vazby k okolí. U inverzní úlohy je tomu přesně naopak a úloha poloinverzní představuje, kombinaci předchozích dvou. Tyto úlohy lze formulovat dvěma způsoby:

- diferenciální formulace
- variační formulace

V případě diferenciálního přístupu řešíme výpočet jako soustavu diferenciálních rovnic. Pro obecnou prostorovou úlohu dostáváme patnáct rovnic. Tři rovnice rovnováhy, šest rovnic geometrických a šest rovnic fyzikálních. V kartézském systému všechny tyto rovnice představují neznámé funkce souřadnic x, y, z . Takováto soustava však poskytuje nekonečně mnoho řešení, proto je nutné zavést okrajové podmínky a nalézt takové řešení, které jim vyhovuje. [13]

Variační přístup pracuje s principem virtuálních prací a variačními principy mechaniky poddajného tělesa. Nejznámější je Lagrangeův princip, definován větou o minimu potenciální energie systému. Ta říká, že „Ze všech kinematicky přípustných stavů pružného tělesa nastává takový stav, který dává potenciální energii systému minimální hodnotu.“ [13]

6.1.3 Metody řešení

Existují dvě základní možnosti řešení výše uvedených problémů:

- analytické řešení
- numerické řešení

Historicky starší analytické řešení je založeno na hledání výsledku tvaru spojitých funkcí, pomocí diferenciálního a derivačního počtu. Tento způsob je však použitelný jen pro úzkou škálu, zpravidla velmi zjednodušených úloh, protože takové řešení je velmi složité. Při úspěšném nalezení řešení v uzavřeném tvaru však dostáváme přímou funkční závislost mezi vstupními a výstupními veličinami, které lze s výhodou použít pro řešení obdobných problémů. [13]

V dnešní době používanější numerické řešení je na rozdíl od analytického přibližné. Hledá konečný počet neznámých parametrů, pomocí nichž se hledané funkce aproximují. Jde o diskretizaci spojitého problému. Vzhledem ke složitosti je v podstatě nemožné nalézt řešení bez použití výpočetní techniky. Teoreticky lze řešit jakkoli komplikovanou úlohu, prakticky je však proces omezen právě kapacitou použitého hardware (počet jader procesoru, velikost paměti RAM) a časovými nároky na výpočet. Při optimalizaci a úpravách modelu je většinou nutné opakování celého procesu jeho tvorby a řešení. Existuje mnoho různých metod numerického řešení, v současnosti nejrozšířenější je MKP. [13]

6.2 Druhy výpočtových analýz a optimalizací

MKP analýzy pracují na principu výše popsaného numerického řešení a simulují působení vlivů okolí na model tvořený konečně-prvkovou sítí, přičemž elementy mají definovanou velikost, tvar, řád, atd. Jako příklady lze uvést tyto druhy:

- strukturální analýza
- termální analýza
- akustická analýza
- únavová analýza

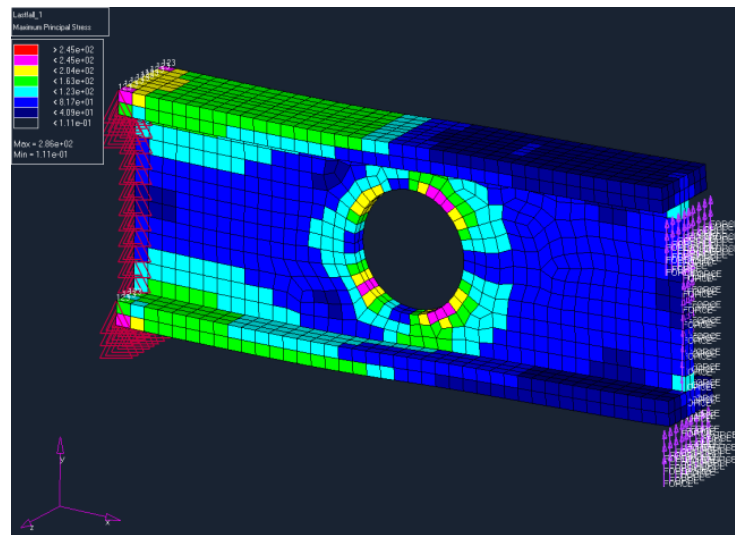
Kromě analyzování již navrženého modelu lze ale výpočtové metody použít také k designové optimalizaci modelu ještě před, resp. namísto procesu jeho návrhu. [15]

Optimalizovat lze těmito přístupy:

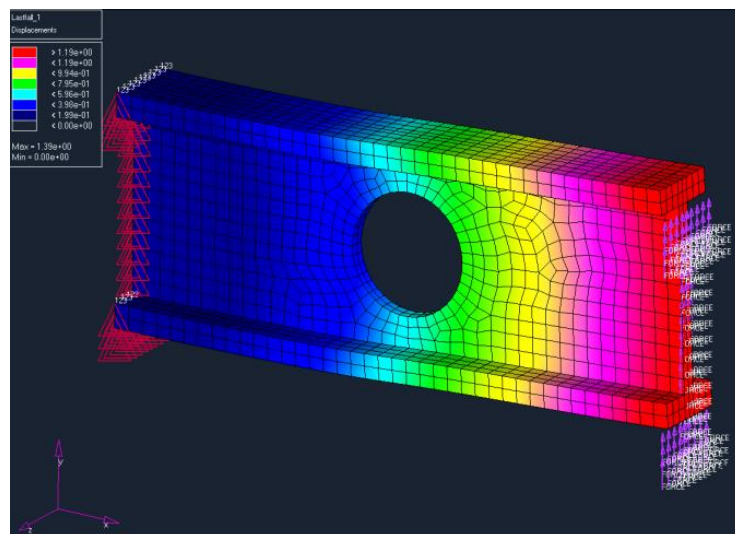
- topologická optimalizace
- topografická optimalizace
- optimalizace tvaru
- optimalizace velikosti

Výhodou použití designové optimalizace je, že při návrhu designu součásti může „na-směrovat“ konstruktéra správným směrem a tím ušetřit kroky spojené s návrhem kon-ceptu tvaru a jeho pozdějším předěláváním. [15]

6.2.1 Lineární statická analýza



Obr. 6.3: Výsledek analýzy – zobrazení napětí [15]



Obr. 6.4: Výsledek analýzy – zobrazení posunutí uzlů [15]

Nejjednodušším případem MKP analýzy je lineární statická analýza. Tento druh analýzy je použit i v této práci při návrhu jednotlivých modelů těhlic vozu FSAE. Základem je řešení rovnice:

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{u} = \mathbf{P} \quad (6.8)$$

kde \mathbf{K} představuje matici tuhosti, \mathbf{u} je vektor posunutí a \mathbf{P} je vektor statického zatížení působícího na strukturu. Na model jsou aplikovány O.P., které mu odebírají potřebné stupně volnosti ve zvolených uzlech tak, aby byla úloha staticky určitá. Na základě aplikace statického zatížení pak pomocí Gaussovy eliminace dojde k řešení neznámých posunutí uzlů spojujících jednotlivé elementy sítě. Jakmile jsou tyto posunutí vyřešeny, lze je interpretovat jako deformaci elementů ε a aplikací Hookova zákona pak lze pro známý materiál E vypočítat i napětí:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (6.9)$$

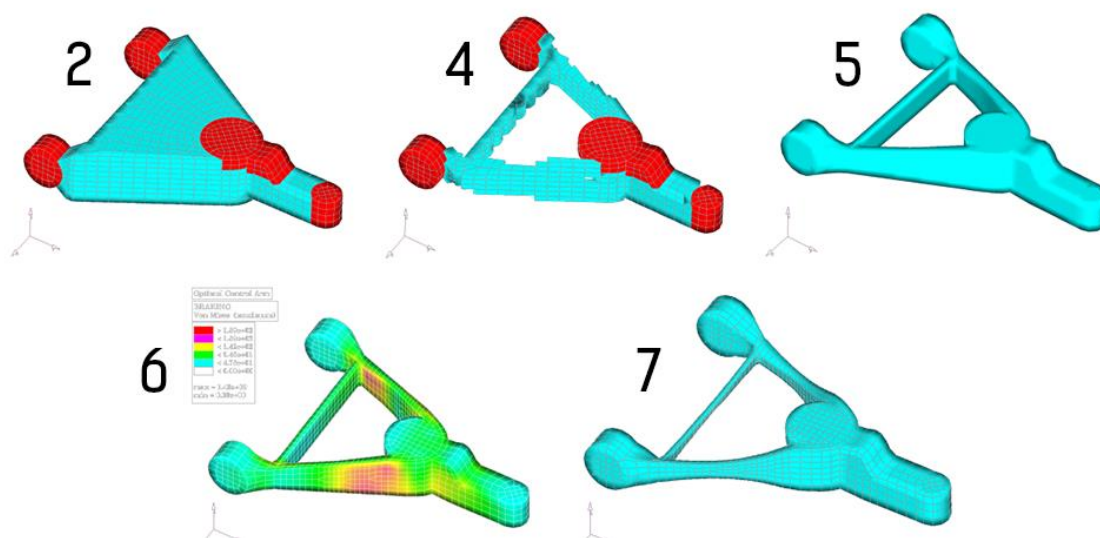
Výsledkem jsou (typicky při použití tzv. post-procesoru) grafická vyobrazení posunutí uzlů sítě (displacement) (viz obr. 6.4), napětí (stress) (viz obr. 6.3), příp. deformace elementů (strain). [15]

6.2.2 Topologická optimalizace

TO pracuje většinou na principu minimalizace objektivní funkce. Tou může být např. objem nebo hmotnost optimalizovaného dílce. Této minimalizace docíluje prostřednictvím designové proměnné, což je hustota elementů počáteční sítě, která představuje „obálku“ optimalizovaného tvaru. Výpočet se řídí O.P. což jsou typicky zadané max. posunutí zvolených uzlů, nebo max. napětí. Tyto hodnoty poté vyhodnocuje na základě stejných principů, jakými pracuje MKP. Stručně se dá proces optimalizace shrnout do následujících kroků (viz obr. 6.5): [15]

1. Tvorba modelu z konečně-prvkové sítě.
2. Rozdělení sítě na pevnou a volnou část. Pevná část obsahuje elementy, do kterých optimalizace nebude zasahovat, tvar této části se tedy nezmění (červená). Naopak část s volnými elementy je ta, jejíž tvar se bude jednotlivými iteracemi během výpočtu měnit (modrá).
3. Zavedení zatížení, vazeb a O.P. a spuštění výpočtu.
4. Zamaskování elementů s hustotou pod zvolený práh (např. 60%).

5. Úprava optimalizovaného (tzv. organického) tvaru v CAD programu.
6. MKP analýza upraveného optimalizovaného tvaru.
7. Případná další optimalizace např. optimalizace tvaru.



Obr. 6.5: Jednotlivé kroky návrhu součásti s použitím TO [15]

7 Zatížení těhlice

Jedním z prvních kroků praktické části mé DP bylo provést rozbor sil, které působí na vůz ve skutečných jízdních podmínkách. Znalost sil působících na kolo, těhlici a další části zavěšení byla nezbytná. Tvoří totiž vstupní parametry jak pro prvotní návrh konstrukce, tak zejména pro optimalizaci konstrukce pomocí MKP. Vzhledem k tomu, že náš tým studentské formule však byl v tu chvíli teprve v samých začátcích a doposud jsme neměli žádný reálný prototyp vozu, který bychom mohli podrobit jízdním zkouškám, nemohl jsem své výpočty zakládat na skutečných měřených datech. Ani snaha získat tyto data od konkurenčních týmů, byť jen ilustrační, nikam nevedla, protože tyto data patří k základnímu know-how jednotlivých týmu a přísně si je střeží.

Po konzultaci ve firmě BENTELER ČR s.r.o., která mi nabídla pomoc s řešením MKP a TO, jsem se tedy rozhodl přistupovat k problému tak, že úvahou stanovím jízdní režimy, kterým může vůz během závodů podléhat, a silový rozbor provedu z mě známých vstupních parametrů, jako je navrhovaná hmotnost vozidla (i s řidičem), poloha těžiště, předpokládané konstrukční rozměry vozu, jízdní časy jednotlivých disciplín zjištěné z výsledkových listin minulých ročníků, parametry trati, výsledky jiných DP, zabývajících se obdobnou tematikou, z minulých let, atd.

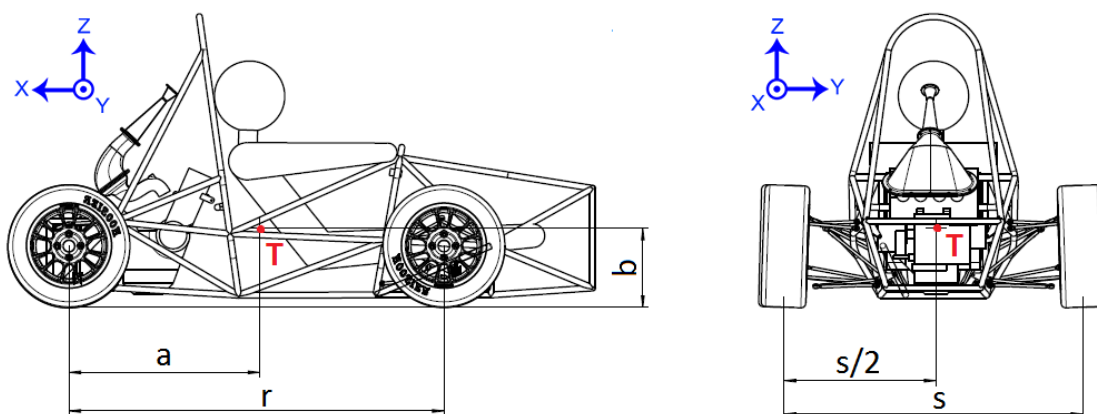
Jízdní režimy, při kterých bude docházet k největšímu silovému zatížení zadní těhlice jsem zvolil následovně:

- průjezd zatáčkou při konstantní rychlosti
- prudká akcelerace
- prudké brždění
- přejezd nerovnosti při konstantní rychlosti

7.1 Rozložení hmotnosti vozu

Pro výpočet rozložení hmotnosti a umístění těžiště vozu jsem použil CAD program CREO, ve kterém je možnost zjistit polohu těžiště po zadání materiálových vlastností a příslušného souřadnicového systému (SS) CAD modelu. Tento model jsem měl již k dispozici od kolegů, kteří se zabývali návrhem trubkového rámu vozu a dalších komponent. Pro snazší výpočet jsem musel model poněkud zjednodušit. Hlavní hmotnostní podíl měl ocelový trubkový rám, jehož hmotnost jsem určil pomocí zadání hustoty v programu

CREO. Dále to byly hliníková kola OZ Racing 7x13 s pneumatikami AVON 7.2/20.0-13 a motor Suzuki GSX-R 600 (r.v. 2005), hmotnosti těchto komponent jsem určil z manuálů výrobce. Velký podíl měla také postava řidiče, jehož hmotnost byla určena dohodou s kolegy. Jednotlivé hmotnosti a poloha těžiště určená pomocí programu CREO jsou znázorněny v obr. 7.1, tab. 7.7.I a tab. 7.7.II. Je patrné, že rozdělení hmotnosti mezi přední a zadní nápravu je téměř 50/50.



Obr. 7.1: Poloha těžiště na zjednodušeném CAD modelu

Tab. 7.7.I: Poloha těžiště vozu

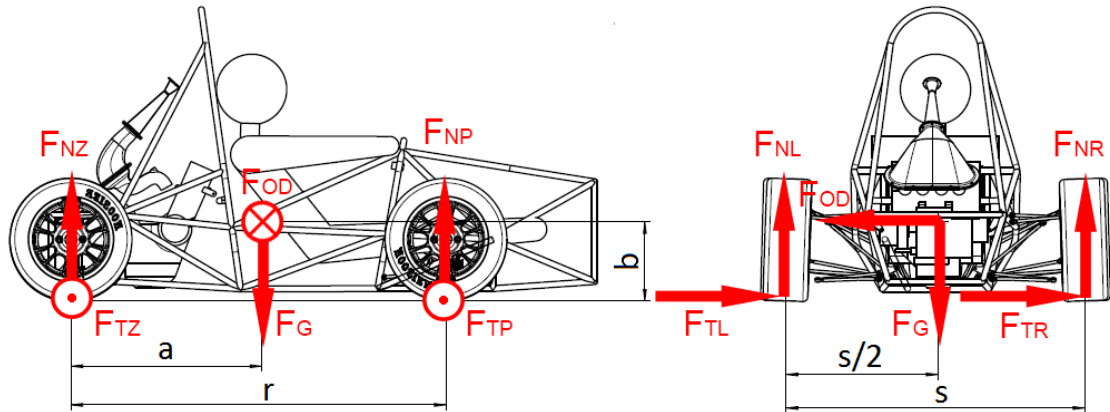
Značka	[mm]
r	1600
a	815
b	338
S	1274

Tab. 7.7.II: Hmotnosti jednotlivých dílů

Prvek	Značka	[kg]
Trubkový rám	m_r	75
Ráfky OZ [16]	m_{oz}	2,45
Pneumatiky AVON [17]	m_{av}	5,61
Motor Suzuki [18]	m_m	70
Řidič (návrh)	$m_{\check{r}}$	70
Celk. hm. vozu (návrh)	m	350

7.2 Průjezd zatáčkou při konstantní rychlosti

Při tomto jízdní režimu uvažuji nejvyšší míru bočního zatížení těhlice. Zvolil jsem pravočivou zatáčku a krajní situaci, kdy kola na levé straně vozidla jsou na mezi styku s vozovkou, ale ještě nedochází k převrácení vozidla. Z toho vyplývají následující okrajové podmínky (O.P.): $F_{NR} = 0$; $F_{TR} = 0$. Při výpočtu zanedbávám valivý odpor, odpor vzduchu a uvažuji maximální adhezi.



Obr. 7.2: Zatížení působící na vůz při průjezdu zatáčkou

Vstupní parametry:

- Hmotnost vozidla: $m = 350 \text{ kg}$

Výpočet sil od vozovky na LZ kolo (viz obr. 7.2):

- Rovnice rovnováhy:

$$F_{NR} + F_{NL} - F_G = 0 \quad (7.1)$$

$$F_{TL} - F_{OD} + F_{TR} = 0 \quad (7.2)$$

$$F_G \cdot \frac{s}{2} - F_{OD} \cdot b - F_{NR} \cdot s = 0 \quad (7.3)$$

- Tíhová síla:

$$F_G = m \cdot g = 350 \cdot 9,81 = \mathbf{3434 \text{ N}} \quad (7.4)$$

- Odstředivá síla:

$$F_{OD} = \frac{F_G \cdot \frac{s}{2} - F_{NR} \cdot s}{b} = \frac{3434 \cdot 0,637 - 0}{0,338} = \mathbf{6412\ N} \quad (7.5)$$

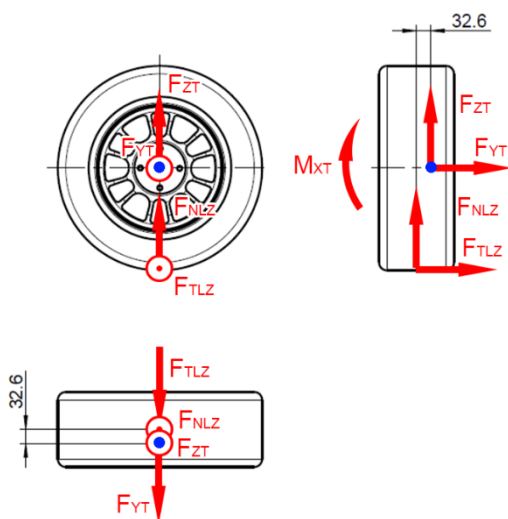
- Tečná síla na LZ kolo:

$$F_{TLZ} = \left(1 - \frac{a}{r}\right) \cdot F_{OD} = \left(1 - \frac{0,815}{1,6}\right) \cdot 6412 = \mathbf{3146\ N} \quad (7.6)$$

- Norm. síla na LZ kolo:

$$F_{NLZ} = \left(1 - \frac{a}{r}\right) \cdot F_G = \left(1 - \frac{0,815}{1,6}\right) \cdot 3434 = \mathbf{1685\ N} \quad (7.7)$$

Výpočet sil od náboje na těhlici (viz obr. 7.3):



Pozn.: Působíště sil a momentů na těhlici je vyznačeno modrou tečkou.

Obr. 7.3: Síly na těhlici při průjezdu zatáčkou

- Síla v ose Z:

$$F_{ZT} = F_{NLZ} = \mathbf{1685\ N} \quad (7.8)$$

- Síla v ose Y:

$$F_{YT} = F_{TLZ} = \mathbf{3146\ N} \quad (7.9)$$

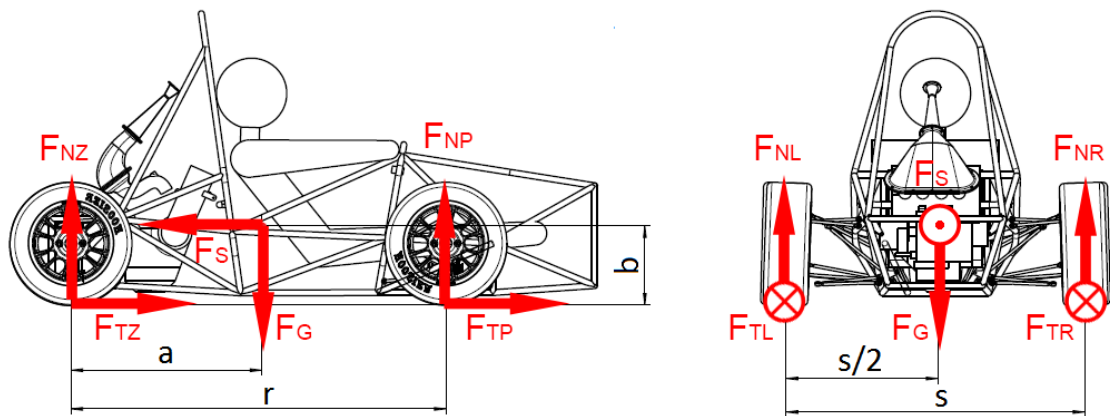
- Moment kolem osy X:

$$M_{XT} = F_{NLZ} \cdot 0,0326 = \mathbf{55\ Nm} \quad (7.10)$$

7.3 Prudká akcelerace

Důvodem, pro volbu tohoto jízdního, stavu bylo prověření největších podélných sil působících na těhlici. Vzhledem k tomu, že poháněná je pouze zadní náprava, veškerou trakční sílu budou přenášet právě zadní kola. Předpokládám minimální svornost samosvorného diferenciálu, proto rozložení trakční síly na zadních kolech bude v poměru 50/50. Dále zanedbávám valivý odpor, odpor vzduchu a uvažuji maximální adhezi na zadních kolech. Z výše uvedeného vyplývají následující O.P.: $F_{TP} = 0$.

Vstupní parametry pro výpočet jsem získal z manuálu k motocyklu Suzuki GSX-R 600, jehož motor bude pro vůz použit a dále z konzultace s týmovým kolegou, který se zabýval návrhem pohonu. [18]

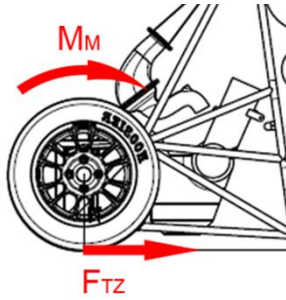


Obr. 7.4: Zatížení působící na vůz při prudké akceleraci

Vstupní parametry:

- Max. kroutící moment motoru: $M_{kmax} = 69 \text{ Nm}$
- Primární převod: $i_p = 1,926$
- Převod na 1. rychlostním stupni: $i_1 = 2,785$
- Převod z pastorku na rozetu diferenciálu: $i_d = 3,214$
- Průměr kola: $d = 521 \text{ mm}$

Výpočet sil od vozovky na LZ kolo (viz obr. 7.4):



Obr. 7.5: Zatížení zadní nápravy kr. momentem motoru

- Rovnice rovnováhy:

$$F_{TZ} - F_S + F_{TP} = 0 \quad (7.11)$$

$$F_{NZ} + F_{NP} - F_G = 0 \quad (7.12)$$

$$F_G \cdot a - F_{NP} \cdot r - F_S \cdot b = 0 \quad (7.13)$$

- Kroutící moment od motoru (viz obr. 7.5):

$$M_M = M_{kmax} \cdot i_p \cdot i_1 \cdot i_d = \mathbf{1190 \text{ Nm}} \quad (7.14)$$

- Trakční (tečná) síla na zadní nápravě:

$$F_{TZ} = \frac{2 \cdot M_M}{d} = \frac{2 \cdot 1190}{0,521} = \mathbf{4568 \text{ N}} \quad (7.15)$$

- Tečná síla na LZ kolo:

$$F_{TLZ} = \frac{F_{TZ}}{2} = \mathbf{2284 \text{ N}} \quad (7.16)$$

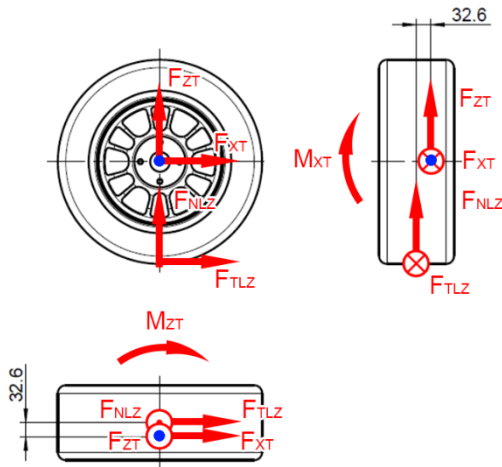
- Norm. síla na přední nápravu:

$$F_{NP} = \frac{F_G \cdot a - F_S \cdot b}{r} = \frac{3434 \cdot 0,815 - 4568 \cdot 0,338}{1,6} = \mathbf{784 \text{ N}} \quad (7.17)$$

- Norm. síla na LZ kolo:

$$F_{NLZ} = \frac{F_G - F_{NP}}{2} = \frac{3434 - 784}{2} = \mathbf{1325 \text{ N}} \quad (7.18)$$

Výpočet sil od náboje na těhlici (viz obr. 7.6):



Pozn.: Působíště sil a momentů na těhlici je vyznačeno modrou tečkou.

Obr. 7.6: Síly na těhlici při akceleraci

- Síla v ose Z:

$$F_{ZT} = F_{NLZ} = 1325 \text{ N} \quad (7.19)$$

- Síla v ose X:

$$F_{XT} = F_{TLZ} = 2284 \text{ N} \quad (7.20)$$

- Moment kolem osy X:

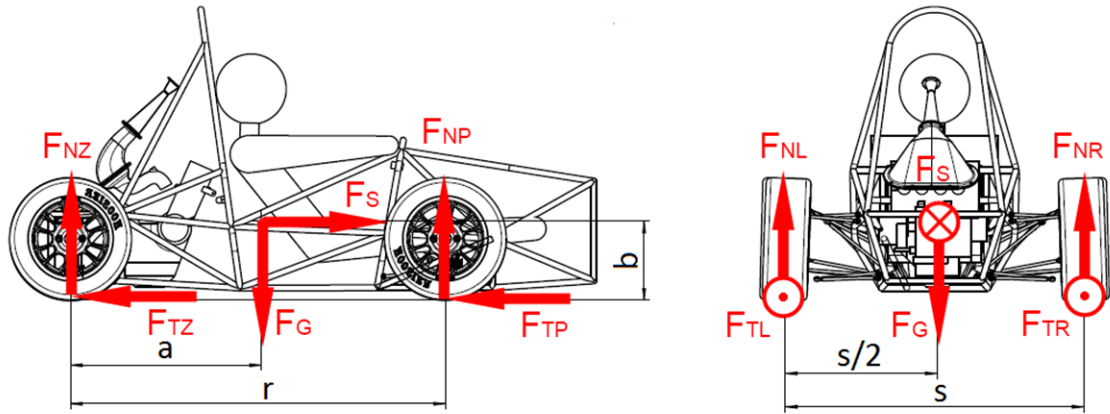
$$M_{XT} = F_{NLZ} \cdot 0,0326 = 43 \text{ Nm} \quad (7.21)$$

- Moment kolem osy Z:

$$M_{ZT} = F_{TLZ} \cdot 0,0326 = 74 \text{ Nm} \quad (7.22)$$

7.4 Prudké brždění

Tento jízdní stav jsem opět volil kvůli prověření podélných sil působících na zadní kola, které však v tomto případě působí opačně, než při akceleraci. Těhlici také navíc bude zatěžovat brzdny moment, který je při brždění přenášen do úchytů od brzdového třmenu. Uvažuji maximální adhezi, valivé tření zanedbávám. Vstupní parametry pro výpočet sil jsem založil na výsledcích z jiných DP, které se věnovaly problematice návrhu těhlic vozu FSAE a na skriptech zabývajících se příklady z dynamiky vozidel. [19], [20]



Obr. 7.7: Zatížení působící na vůz při prudkém brždění

Vstupní parametry:

- Poměrné zpomalení: $z = 0,8$
- Souč. valivé přilnavosti: $f_z = 0,9$
- Max. zpomalení: $a_{max} = 13 \text{ ms}^{-2}$

Výpočet sil od vozovky na LZ kolo (viz obr. 7.7):

- Rozložení brzdných sil přední/zadní náprava:

$$\frac{F_{TZ}}{F_T} = \frac{f_z \cdot \left[\left(\frac{r-a}{r} \right) - z \cdot \left(\frac{b}{l} \right) \right]}{z} = 0,362 = i \quad (7.23)$$

$$\frac{F_{TP}}{F_T} = 1 - i = 1 - 0,362 = 0,638 \quad (7.24)$$

$$F_{TP} = \frac{0,638}{0,362} \cdot F_{TZ} \quad (7.25)$$

- Rovnice rovnováhy:

$$F_S - F_{TZ} - F_{TP} = 0 \quad (7.26)$$

$$F_{NZ} + F_{NP} - F_G = 0 \quad (7.27)$$

$$F_G \cdot a - F_{NP} \cdot r + F_S \cdot b = 0 \quad (7.28)$$

- Setrvačná síla:

$$F_S = m \cdot a_{max} = 350 \cdot 13 = 4550 \text{ N} \quad (7.29)$$

- Tečná síla zadní nápravě:

$$F_{TZ} = \frac{F_s}{1 + \frac{0,638}{0,362}} = \frac{4550}{1 + \frac{0,638}{0,362}} = \mathbf{1647\ N} \quad (7.30)$$

- Tečná síla na LZ kolo:

$$F_{TLZ} = \frac{F_{TZ}}{2} = \mathbf{824\ N} \quad (7.31)$$

- Norm. síla na přední nápravu:

$$F_{NP} = \frac{F_s \cdot b + F_G \cdot a}{r} = \frac{4550 \cdot 0,338 + 3434 \cdot 0,815}{1,6} = \mathbf{2710\ N} \quad (7.32)$$

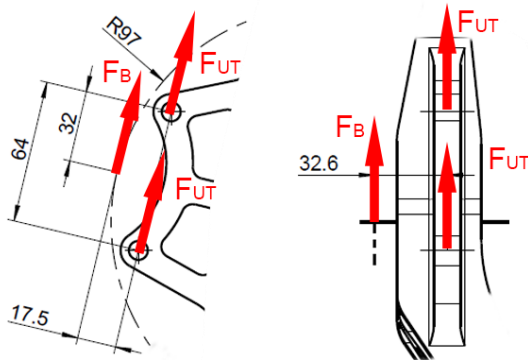
- Norm. síla na zadní nápravu:

$$F_{NZ} = F_G - F_{NP} = \mathbf{724\ N} \quad (7.33)$$

- Norm. síla na LZ kolo:

$$F_{NLZ} = \frac{F_{NZ}}{2} = \frac{724}{2} = \mathbf{362\ N} \quad (7.34)$$

Výpočet sil do úchyty brzdového třmene (viz obr. 7.8):



Obr. 7.8: Síly na úchyt brzdového třmene

Pozn.: I přes fakt, že působí síla F_B neleží v ose působí sil F_{UT} zde neuvažují momentové zatížení úchyty třmene, protože při sevření kotouče brzdovými čelistmi je zamezeno jakémukoli natočení brzd. třmene. Proto bude přenášet pouze podélnou sílu.

- Brzdný moment:

$$M_B = F_{TLZ} \cdot \frac{d}{2} = 824 \cdot \frac{0,521}{2} = \mathbf{215\ Nm} \quad (7.35)$$

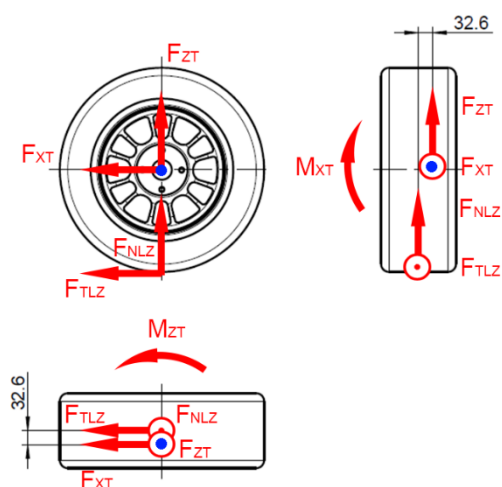
- Brzdná síla:

$$F_B = \frac{M_B}{0,097} = \frac{215}{0,097} = \mathbf{2216\ N} \quad (7.36)$$

- Síla do oka úchytu:

$$F_{UT} = \frac{F_B}{2} = \frac{2216}{2} = \mathbf{1108\ N} \quad (7.37)$$

Výpočet sil od náboje na těhlici (viz obr. 7.9):



Pozn.: Působíště sil a momentů na těhlici je vyznačeno modrou tečkou.

Obr. 7.9: Síly na těhlici při brždění

- Síla v ose Z:

$$F_{ZT} = F_{NLZ} = \mathbf{362\ N} \quad (7.38)$$

- Síla v ose X:

$$F_{XT} = F_{TLZ} = \mathbf{824\ N} \quad (7.39)$$

- Moment kolem osy X:

$$M_{XT} = F_{NLZ} \cdot 0,0326 = \mathbf{12\ Nm} \quad (7.40)$$

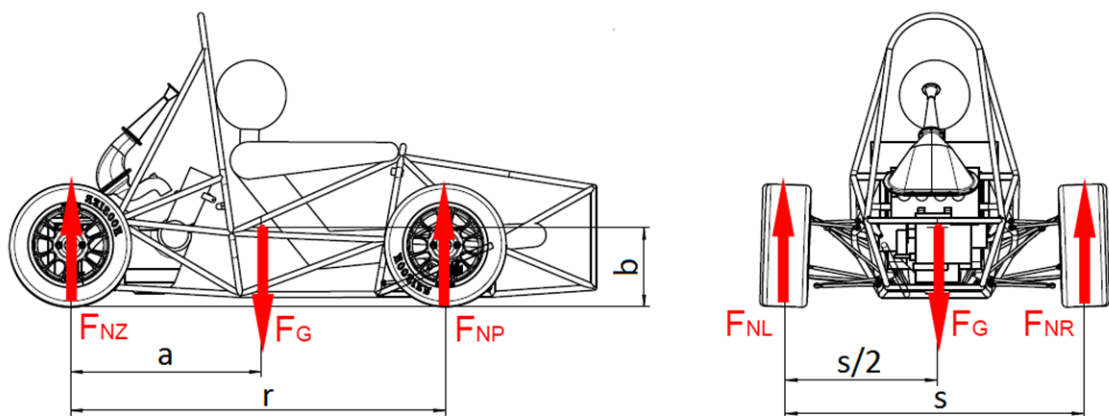
- Moment kolem osy Z:

$$M_{ZT} = F_{TLZ} \cdot 0,0326 = \mathbf{27\ Nm} \quad (7.41)$$

7.5 Přejezd nerovnosti při konstantní rychlosti

Z hlediska jízdních podmínek, kterým je vůz vystaven během závodů FSAE, není tento stav kritický, protože závodní trať se ve většině případů nachází na rovném a kvalitním povrchu (části závodních okruhů, malá letiště, atd.) a neobsahuje žádné retardéry či obrubníky, jako tomu bývá např. u závodů vozů F1. Hranice zatáček jsou tvořeny z dopravních kuželů. Tento jízdní stav jsem ale chtěl zohlednit s přihlédnutím k faktu, že v případě kdy řidič nezvládne kontrolu nad svým vozem, může vůz opustit trať a vjet např. do trávy. A navíc v běžné praxi, je, při návrhu podvozkových dílů osobních automobilů, tento stav vždy zohledněn.

Po konzultaci s pracovníky z oddělení CAE firmy BENTELER ČR s.r.o., kteří se zabývají analýzou a výpočty podvozkových dílů osobních automobilů, mi bylo doporučeno uvažovat zatížení při přejezdu nerovnosti jako 1,5 násobek statického tíhového zatížení vozidla.



Obr. 7.10: Zatížení působící na vůz při přejezdu nerovnosti

Vstupní parametry:

- Hmotnost vozidla: $m = 350 \text{ kg}$
- Koeficient přetížení: $i = 1,5$

Výpočet sil od vozovky na LZ kolo (viz obr. 7.10):

- Rovnice rovnováhy:

$$F_{NZ} - F_G + F_{NP} = 0 \quad (7.42)$$

$$F_{NZ} \cdot r - F_G \cdot (r - a) = 0 \quad (7.43)$$

- Tíhová síla:

$$F_G = i \cdot m \cdot g = 1,5 \cdot 350 \cdot 9,81 = \mathbf{5150 \text{ N}} \quad (7.44)$$

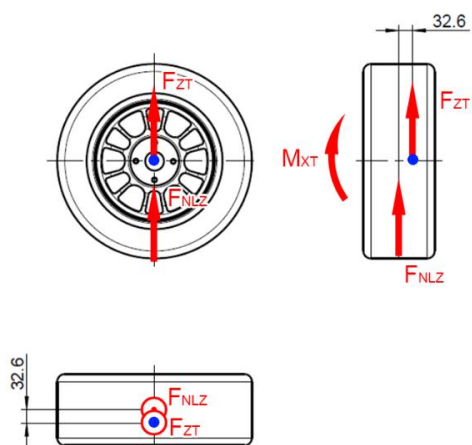
- Norm. síla na zadní nápravu:

$$F_{NZ} = \frac{F_G \cdot (r - a)}{r} = \frac{5150 \cdot (1,6 - 0,815)}{1,6} = \mathbf{2526 \text{ N}} \quad (7.45)$$

- Norm. síla na LZ kolo:

$$F_{NLZ} = \frac{F_{NZ}}{2} = \frac{2526}{2} = \mathbf{1263 \text{ N}} \quad (7.46)$$

Výpočet sil od náboje na těhlici (viz obr. 7.11):



Pozn.: Působíště sil a momentů na těhlici je vyznačeno modrou tečkou.

Obr. 7.11: Síly na těhlici při přejezdu nerovnosti

- Síla v ose Z:

$$F_{ZT} = F_{NLZ} = \mathbf{1263 \text{ N}} \quad (7.47)$$

- Moment kolem osy X:

$$M_{XT} = F_{NLZ} \cdot 0,0326 = \mathbf{41 \text{ Nm}} \quad (7.48)$$

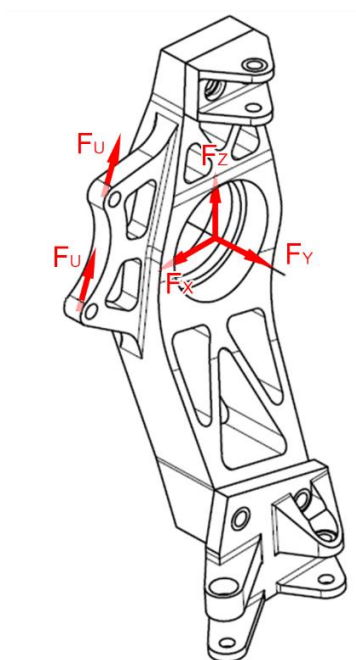
7.6 Shrnutí

Z níže uvedené tabulky je zřejmé, že k největšímu zatížení zadní těhlice bude docházet při průjezdu ostrou zatáčkou, prudké akceleraci a prudkém brždění, kde sice nebude docházet k nijak významnému zatížení těhlice od náboje, ale bude docházet k velikému zatížení v oblasti uchycení brzdového třmene. Proto je nutné pro výpočet těhlice pomocí MKP i tento stav zohlednit.

Na obr. 7.12 je vidět způsob zatížení těhlice. Pro směr momentového zatížení platí pravidlo pravé ruky.

Tab. 7.7.II: Porovnání silových zatížení těhlice v jednotlivých jízdních režimech

Jízdní stav	F_x [N]	F_y [N]	F_z [N]	M_x [Nm]	M_z [Nm]	F_U [Nm]
Průjezd zatáčkou při k. r.	-	3146	1685	55	-	-
Prudká akcelerace	2284	-	1325	43	74	-
Prudké brždění	824	-	362	12	27	1108
Přej. nerovnosti při k. .r	-	-	1263	41	-	-



Obr. 7.12: Orientaci sil na těhlici

8 Návrh modelů těhlice

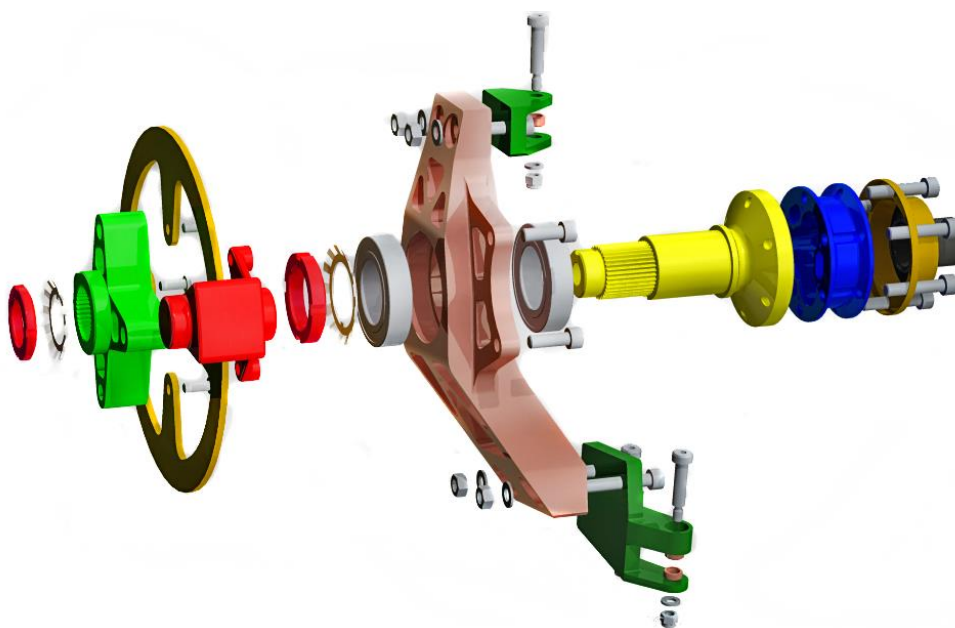
8.1 Návrh sestavy uložení kola

Před samotným návrhem jednotlivých variant designu těhlice, jsem nejprve musel provést prvotní návrh celé sestavy uložení levého zadního kola (viz obr. 8.1), včetně náboje, způsobu jeho montáže atd. Nábojem a ostatními díly uložení se již v této práci dále nezabývám, nicméně výše popsáný krok byl nezbytný, protože návrh těhlice je na ostatních dílech uložení kola přímo závislý.

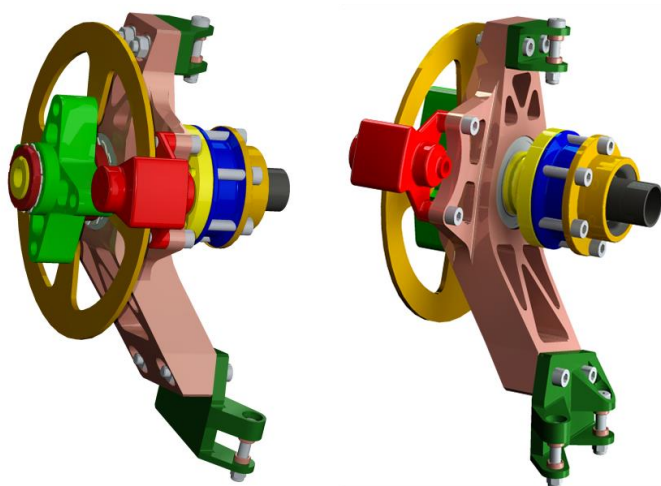
Od kolegů z týmu FSAE jsem dostal informace o použití těchto dílů:

- Ložiska: radiální jednořadá kuličková – typ 6008
- Brzdový třmen: dvoupístkový AP Racing CP4226-2S0
- Brzdový kotouč: $\varnothing 220 - 4$ mm
- Ráfek: hliníkový OZ Racing 7x13“ upnutí na 4 díry
- Tripod: Taylor Race Engineering INV-02002081
- Kulové čepy: známé rozměry

Také mi byly známy souřadnice polohy jednotlivých kinematických bodů (čepy, střed kola, tripod) vůči základnímu SS vozu (viz příloha č.6).



Obr. 8.1: Sestava uložení zadního kola (rozpad)



Obr. 8.2: Sestava uložení zadního kola

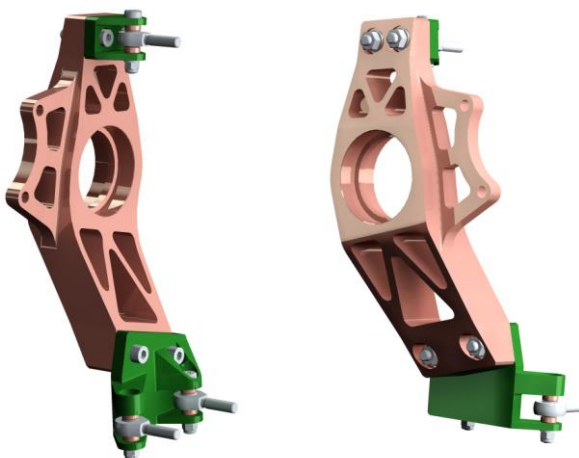
8.2 Model č.1 – výroba frézováním

K prvnímu designovému návrhu jsem přistupoval s tím, že pro jeho výrobu zvolím konvenční metodu – frézování. Proto jsem se snažil design navrhnout tak, aby byl co možná nejjednodušší a bez problému vyrobitelný na běžných CNC obráběcích centrech.

8.2.1 Varianta č.1

S návrhem sestavy uložení jsem dostal zároveň i podobu první varianty sestavy těhlice (viz obr. 8.3). Skládá se ze tří hlavních dílů:

- těleso těhlice
- horní vidlice
- spodní vidlice



Obr. 8.3: Návrh sestavy těhlice pro frézování - varianta č.1

Těhlice je s vidlicemi spojena šroubovými spoji: šrouby s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem o velikosti M8, podložkami a šestihrannými maticemi. Pro připojení kulových čepů k vidlicím, jsem zvolil lícované šrouby s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem o velikosti M6, podložky a šestihranné samojistné matice. Vymezení polohy kulového čepu ve vidlici zajišťují distanční vložky.

8.2.2 Výpočtová analýza var. č.1

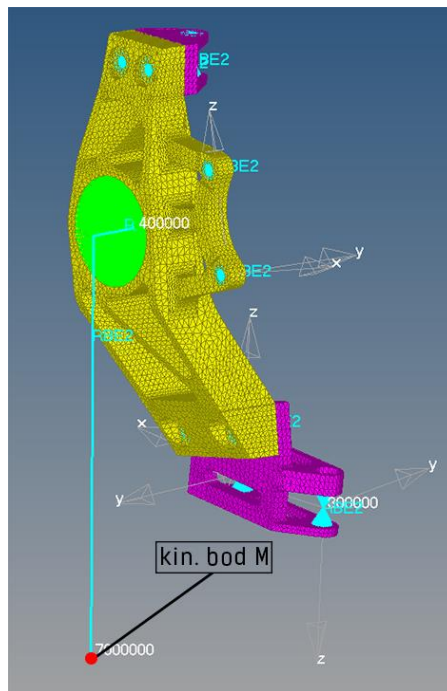
Prvním krokem před samotným spuštěním analýzy, bylo vytvořit objemovou síť. Postupoval jsem tak, že jsem nejprve automatickou funkcí vytvořil povrchovou síť, kterou jsem v místech, kde by mohlo docházet ke koncentraci napětí, manuálně zjemnil (typicky vruby, okolí děr, atd.). Tuto síť jsem poté pomocí automatického generátoru „vysunul“ do objemu. Dále bylo potřeba zavést zatížení, O.P., přiřadit materiálové vlastnosti, zavést lokální SS apod. Parametry analýzy podrobněji znázorňuje tab. 8.1.

Tab. 8.1: Přehled parametrů výpočtové analýzy

Pre-processing:	<ul style="list-style-type: none"> Altair HyperMesh
Řešič:	<ul style="list-style-type: none"> Altair OptiStruct
Post-processing:	<ul style="list-style-type: none"> Altair HyperView
Cíle analýzy:	<ul style="list-style-type: none"> Max. napětí v sestavě těhlice nesmí překročit mez kluzu Max. posunutí zvoleného kin. bodu M nesmí překročit 1,5 mm
Způsob zatížení:	<ul style="list-style-type: none"> Na uzel ve středu díry pro ložiska - propojen s tělesem těhlice RBE3 prvky Na uzly ve středech děr úchyty brzd. třmene - propojeny s tělesem těhlice RBE2 prvky
O.P.:	<ul style="list-style-type: none"> Vazby sestavy těhlice s okolím na uzlech ve středech kul. čepů Horní čep - posuv zamezen ve složkách x, y, z globálního SS Spodní čep - posuv zamezen ve složkách x, y lokálního SS Řídící čep - posuv zamezen ve složce y lokálního SS Uzly propojeny s vidlicemi RBE2 prvky
Spojení těhlice s vidlicí:	<ul style="list-style-type: none"> Náhrada šroubového spoje RBE2 prvky

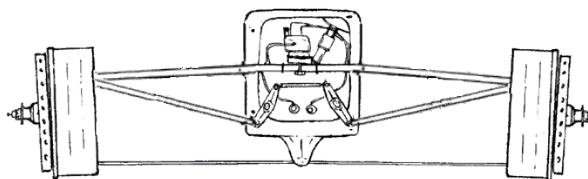
Materiál: [21]	<ul style="list-style-type: none">• Pro všechny 3 díly zvolen Dural EN AW 2024• Mez kluzu $R_{p0,2} = 300 \text{ MPa}$• Modul pružnosti $E = 7,1 \cdot 10^4 \text{ MPa}$• Poissonova konst. $\mu = 0,34$
Sít':	<ul style="list-style-type: none">• Objemová s TETRA elementy 2.řádu

Pozn.1: Zvolený kin. bod M (viz obr. 8.4) představuje bod styku středu pneumatiky s vozovkou. Uzel v tomto bodě, u kterého je hodnoceno max. posunutí je svázán s uzlem ve středu díry pro ložiska prvkem RBE2. Díky tomu je možné zhodnotit i tuhost dílu.



Obr. 8.4: Objemová síť s RBE prvky

Pozn.2: Omezení posuvů v jednotlivých kul. čepch jsem volil s přihlédnutím k faktu, že vůz má na zadním zavěšení použit tzv. Pull-rod systém (viz obr. 8.5).



Obr. 8.5: Zavěšení typu Pull-rod [22]

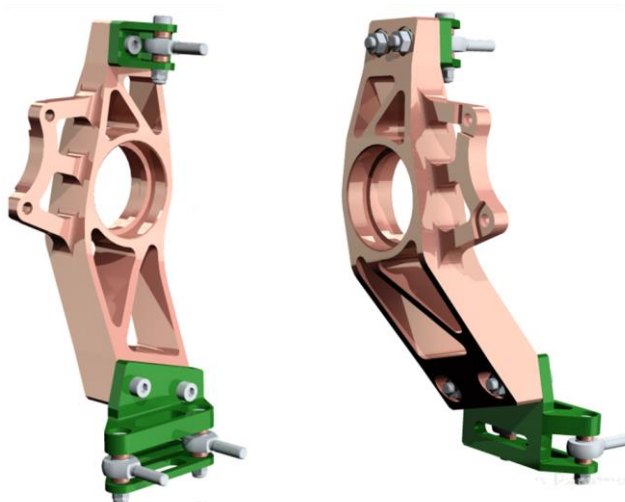
Podrobné výsledky analýzy pro jednotlivé jízdní režimy jsou zobrazeny v příloze č.1.

Z těchto výsledků vyplývá, že maximální napětí dosahuje hodnoty 205 MPa a to v místě mezi uložením čepů ve spodní vidlici. Max. posunutí kinematického bodu M dosahuje hodnoty $1,13 \text{ mm}$. Obě maxima jsou dosaženy při jízdním stavu prudká akcelerace. Hodnoty napětí i posunutí při ostatních jízdních režimech jsou zanedbatelné.

Z výše uvedených výsledků vyplývá, že tento návrh těhlice vyhovuje podmínkám pevnosti i tuhosti s velikou rezervou a je tedy zbytečně předimenzovaný.

8.2.3 Varianta č.2

Na základě výsledků předchozí analýzy jsem se u nového návrhu (viz obr. 8.6) rozhodl těleso těhlice odlehčit (viz obr. 8.8), s výjimkou úchytu třmene brzdy, jehož konstrukci jsem naopak zesílil. Zároveň s tím, jsem však chtěl zvýšit tuhost spodní vidlice, proto jsem tento díl také přepracoval a přidal jsem mu výztuhu mezi oky pro uložení kul. čepů. (viz obr. 8.7). Uspořádání sestavy je jinak shodné s první variantou.



Obr. 8.6: Návrh sestavy těhlice pro frézování - varianta č.2

8.2.4 Výpočtová analýza var. č.2

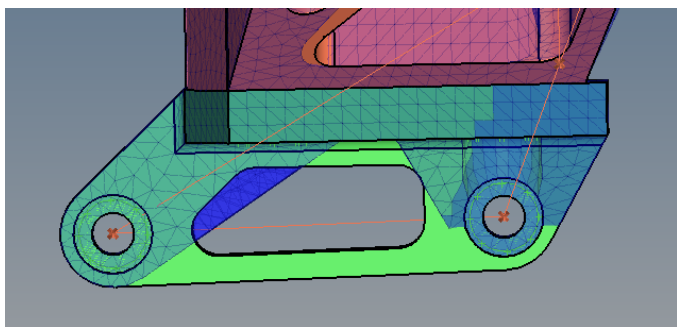
Postup přípravy analýzy i samotné řešení byly totožné s předchozím případem (viz tab. 8.I), proto tomuto nevěnuji zvláštní kapitolu. Podrobné výsledky druhé analýzy pro jednotlivé jízdní režimy jsou zobrazeny v příloze č.2.

Max. napětí dosahuje hodnoty 183 MPa a to v přední části pouzdra pro ložiska, při jízdním stavu prudké brzdění. Max. posunutí kin. bodu M dosahuje hodnoty $1,16 \text{ mm}$ při

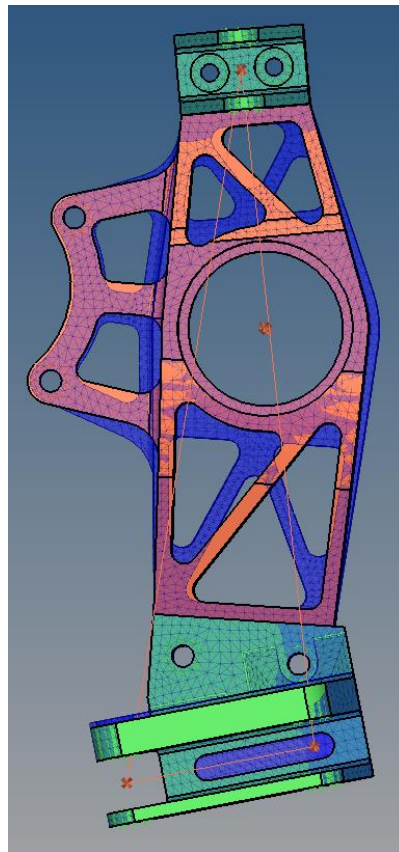
jízdním stavu prudká akcelerace. Zhodnocení úspěšnosti návrhu je provedeno v další kapitole.

8.2.5 Porovnání navržených variant

Z porovnání výsledků max. napětí a posunutí kin. bodu u obou variant je patrné, že u druhé varianty došlo k mírnému zhoršení tuhosti ve směrech os z a y . Tuhost ve směru x zůstala přibližně stejná. Z hlediska tuhosti i napětí druhá varianta stále vyhovuje počátečním kritériům s rezervou. Vlivem lehčí konstrukce však došlo k úspoře hmotnosti o 219 g.



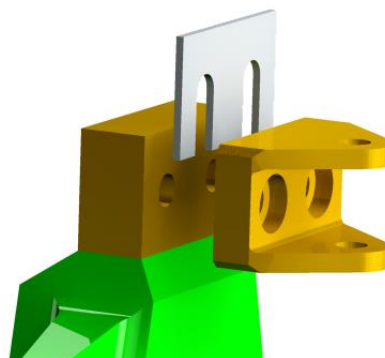
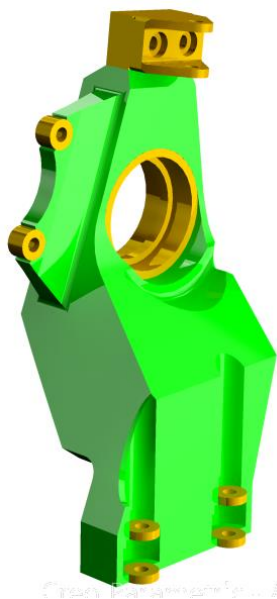
Obr. 8.7: Porovnání tvarů spodní vidlice



Obr. 8.8: Porovnání tvarů těhlice

8.3 Model č.2 – výroba 3D tiskem

K návrhu dílce, který se bude vyrábět pomocí metody SLM jsem přistupoval jinak, než k návrhu pro dílec frézovaný. Zatímco v předchozím případě jsem dle konvenčního přístupu navrhl variantu designu jen na základě svých konstrukčních znalostí, intuice a citu, v případě návrhu pro 3D tiskárnu jsem design řešil pomocí TO. K tomu bylo nejprve nutné navrhnout CAD model „obálky“, ohraničující pole optimalizované (volné) geometrie, a část modelu s pevnou geometrií, která optimalizaci nepodléhá (viz obr. 8.10). Obálka tvoří maximální možný prostor, kam by části těhlice mohly doléhat tak, aby nekolidovaly s ostatními díly. Pevnou geometrií jsou místa uložení kulových čepů, ložisek náboje a brzdového třmenu. Tato varianta je pouze dvoudílná. Horní vidlici jsem zachoval oddělenou z důvodu možnosti štelování odklonu kola a to tak, že by v případě potřeby bylo možné mezi horní vidlici a těleso těhlice vkládat speciální podložky (viz obr. 8.9).



Obr. 8.9: Seřizování odklonu kola

Obr. 8.10: Obálka volné geometrie (zelená) a pevná geometrie (zlatá)

8.3.1 Topologická optimalizace

Před spuštěním procesu TO bylo nutné, podobně jako v případě výpočtové analýzy, vytvořit objemovou síť a zadat potřebné parametry výpočtu. Pro TO je jich ale poněkud více, jejich přehled je v následující tab. 8.II.

Tab. 8.II: Přehled parametrů topologické optimalizace

Pre-processing:	<ul style="list-style-type: none"> Altair HyperMesh
Řešič:	<ul style="list-style-type: none"> Altair OptiStruct
Post-processing:	<ul style="list-style-type: none"> Altair HyperView
Cíle analýzy:	<ul style="list-style-type: none"> Maximalizace tuhosti při minimálním objemu
Způsob zatížení:	<ul style="list-style-type: none"> Na uzel ve středu díry pro ložiska - uzel propojen s tělesem těhlice RBE3 prvky Na uzly ve středech děr úchytu brzd. třmene - uzly propojeny s tělesem těhlice RBE2 prvky
O.P.:	<ul style="list-style-type: none"> Vazby sestavy těhlice s okolím na uzlech ve středech kul. čepů Horní čep - posuv zamezen ve složkách x, y, z globálního SS Spodní čep - posuv zamezen ve složkách x, y lokálního SS Řídící čep - posuv zamezen ve složce y lokálního SS

	<ul style="list-style-type: none"> • Uzly propojeny s horní vidlicí RBE2 prvky • Max. posunutí kin. bodu M 1 mm • Max. posunutí uzlu ve středu díry pro ložiska 0,5 mm • Max. posunutí uzlů ve středech děr úchytu třmenu 0,5 mm • Výsledný objem: 30 % původního objemu (obálky)
Spojení těhlice s horní vidlicí:	<ul style="list-style-type: none"> • Náhrada šroub. spoje RBE2 prvky
Materiál horní vidlice: [21]	<ul style="list-style-type: none"> • Dural EN AW 2024 • Mez kluzu $R_{p0,2} = 300 \text{ MPa}$ • Modul pružnosti $E = 7,1 \cdot 10^4 \text{ MPa}$ • Poissonova konst. $\mu = 0,34$
Materiál těhlice: [23]	<ul style="list-style-type: none"> • Hliníkový prášek AlSi12 pro SLM • Mez kluzu $R_{p0,2} = 240 \text{ MPa}$ • Modul pružnosti $E = 5,5 \cdot 10^4 \text{ MPa}$ • Poissonova konst. $\mu = 0,34$
Síť:	<ul style="list-style-type: none"> • Objemová s TETRA elementy 2.řádu
Proměnná návrhu	<ul style="list-style-type: none"> • Objemová síť v obálce volné geometrie
Směr odběru materiálu:	<ul style="list-style-type: none"> • Osa y globálního SS

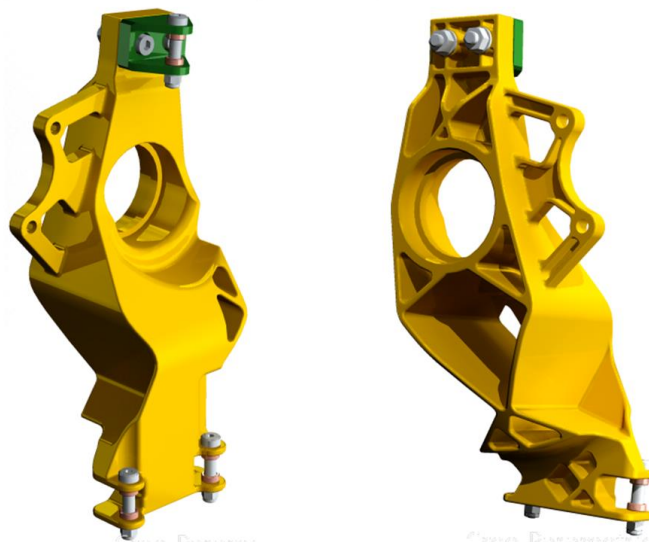
Výpočet TO byl dokončen po 34 iteracích. Podrobné výsledky hustoty elementů, obsahující souhrn všech jízdních režimů, jsou k nahlédnutí v příloze č.3.

Po zobrazení výsledků max. posunutí zvolených uzlů při jednotlivých jízdních režimech, bylo potvrzeno, že vyhovují požadovaným kritériům, To samé platí i pro max. napětí v těhlici. Max. napětí však při výpočtu nebylo možné zohlednit jako O.P., protože nelze naráz optimalizovat jak na posun, tak i napětí, proto je vhodné prověřit výsledný tvar ještě MKP analýzou. Tím se zabývám v další podkapitole.

Také je nutné dodat, že pro opravdu optimální tvar je vhodné celý proces TO několikrát zopakovat. Díky tomu dojde k rozdělení elementů na dvě skupiny: elementy, blíží se svou hustotou 0 a elementy blíží se svou hustotou 1, přičemž první zmiňované se vyloučí a ty druhé pak dávají finální tvar, kde materiál je zachován jen v místech toku napětí. Tento proces je však časově velice náročný a proto jsem si ho vzhledem k termínu odevzdání mé DP nemohl dovolit. Proto jsem se rozhodl zvolit výsledný tvar (viz obr. 8.11) už z první analýzy, jejíž tvorbu jsem konzultoval s odborníkem z firmy Altair a dalo se jí tedy věřit. Neměl jsem však striktně rozděleny elementy tak, jak je popsáno výše. Proto jsem volil výsledný tvar podle citu a rozhodl se vyloučit elementy do hodnoty 0,4.



Obr. 8.11: Organický tvar těhlice po TO



Obr. 8.12: Finální tvar sestavy optimalizované těhlice

8.3.2 Výpočtová analýza optimalizovaného tvaru

Na základě organického tvaru, který jsem získal z TO, jsem vytvořil finální „čistý“ CAD model optimalizovaného dílce (viz obr. 8.12). Před samotným zadáním dílu k 3D tisku jsem ale provedl ještě jednu kontrolní MKP analýzu, a to z toho důvodu, že jsem při TO nemohl zohlednit kritérium max. napětí, jak je popsáno v předchozí podkapitole. Parametry výpočtové analýzy byly v tomto případě stejné jako u analýzy první varianty frézované těhlice (viz tab. 8.I). Jediným rozdílem byly jiné materiálové vlastnosti přiřazené elementům tělesa těhlice. V tomto případě byl zvolen materiál AlSi12, jehož vlastnosti jsou popsány v tab. 8.II.

Podrobné výsledky analýzy pro jednotlivé jízdní režimy jsou zobrazeny v příloze č.4.

Z výsledků vychází, že max. napětí dosahuje 125 MPa v části u horní vidlice, při jízdním stavu prudké brždění. Max. posunutí kin. bodu M je $0,35 \text{ mm}$. Tento návrh tedy vyhovuje požadavkům dostatečné tuhosti a nepřekročení meze kluzu materiálu AlSi12 s velikou rezervou a lze ho tak považovat za úspěšný.

8.4 Shrnutí

Porovnání obou modelů (viz tab. 8.III), kdy jeden byl navržen konvenčním způsobem pro výrobu frézováním a druhý TO pro výrobu 3D tiskem jsem prováděl na základě tří veličin: tuhosti, jejímž ukazatelem byl posun kin. bodu M, napětí a výsledné hmotnosti sestavy těhlice se všemi dalšími díly (šrouby, atd.). Hmotnost jsem získal přiřazením materiálových vlastností jednotlivým CAD modelům a následnou analýzou v programu CREO.

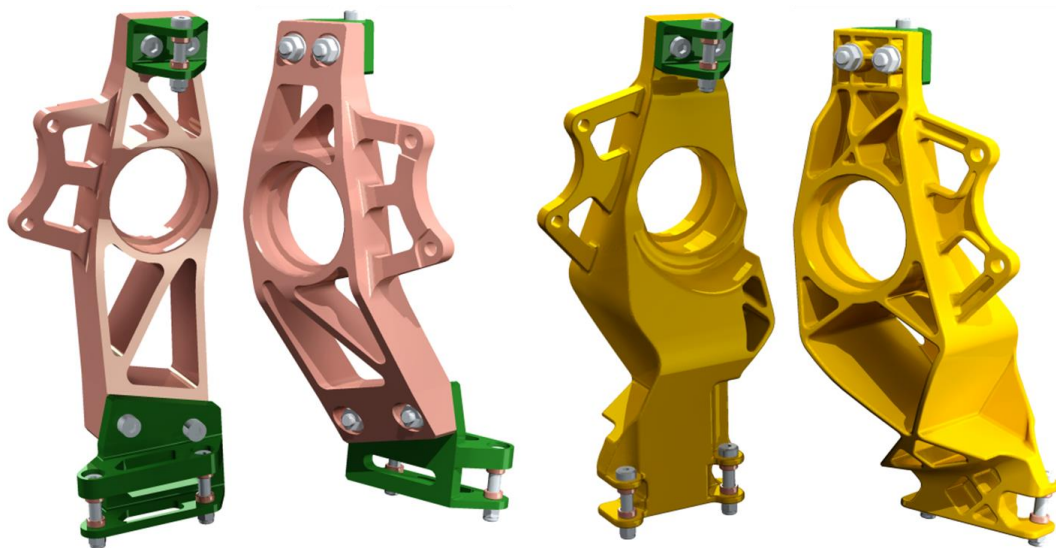
Tab. 8.III: Porovnání mech. vlastností obou modelů (teoretické)

Model č.:	Max. pos. kin. bodu M [mm]	Max. napětí [MPa]	Hmotnost [kg]
1 - frézování	1,16	183	1,375
2 – 3D tisk	0,35	125	1,384

Z tab. 8.III vyplývá, že při prakticky stejné hmotnosti je návrhový model pro výrobu 3D tiskem o 70% tužší ve smyslu zatěžování podle zvolených jízdních režimů.

Je také nutno dodat, že u tohoto modelu byl proveden pouze jeden cyklus TO. Tento model má jednoznačně potenciál k dalšímu snižování hmotnosti, provedením dalších

cyklů TO. Protože ale stroj, na kterém se měl prototyp vyrábět, je časově velice vytížen, ať už z důvodu výzkumů, nebo kvůli externím zakázkám, byl jsem nucen jednat a prototyp zadat do výroby už v této fázi návrhu. Proto ho považuji za finální a popisem jeho výroby se zabývám v další kapitole DP.



Obr. 8.13: Finální návrhy obou těhlic

9 Výroba prototypů

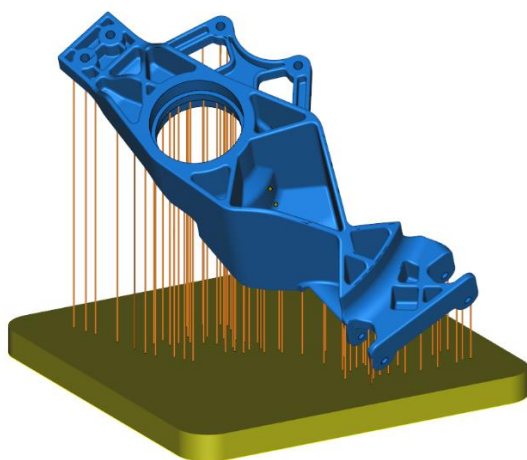
9.1 Výroba metodou SLM

Výroba probíhala v prostorách Laboratoře Rapid Prototyping, sídlící v budově L na Technické univerzitě v Liberci. Tato laboratoř disponuje strojem SLM 280 HL (viz obr. 9.1) od firmy SLM Solutions GmbH. Stroj má prostor pro tisk o velikosti 280x280x365 mm. Tisk proběhl z materiálu AlSi12 v ochranné atmosféře z inertního plynu. Tloušťka vrstvy činila 50 μm a max. výkon laseru 400 W.

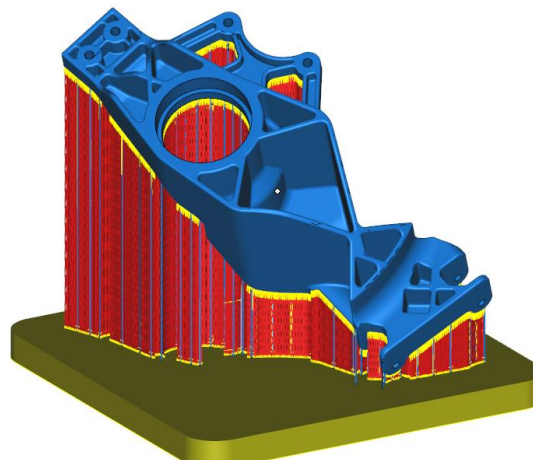
Ve fázi Preprocessingu bylo nejprve nutné vytvořit model, podle kterého tiskárna pracuje. Tvorba proběhla v programu Magics 20. Importovaný CAD model byl vhodně napoložován vzhledem k velikosti použité platformy a co možná nejjistějšímu průběhu tisku. V dalším kroku byly manuálně vytvořeny tzv. piny, které zajišťují pevné spojení určitých bodů na modelu s tiskovou platformou (viz obr. 9.3). Tyto body se volí v místech, kde by hrozilo odtržení od běžné struktury podpůrného materiálu kvůli možnému zkroucení vlivem tepelné roztažnosti. Následně byla v programu automaticky vygenerována struktura podpůrného materiálu (viz obr. 9.2). Fáze Preprocessingu trvala přibližně 3 hod.



Obr. 9.1: 3D tiskárna SLM 280 HL



Obr. 9.3: Tvorba pinů



Obr. 9.2: Podpůrný materiál

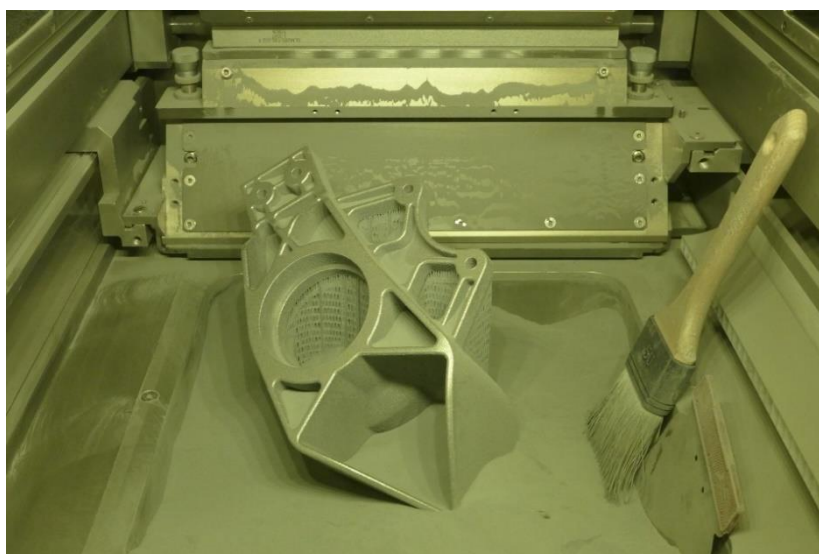
Dále proběhla kontrola dobrého spojení modelu s podpurným materiálem v jednotlivých vrstvách tisku. Nakonec byl proveden export do tzv. slice-file souboru pro 3D tiskárnu.

Před samotným spuštěním tisku bylo ještě zapotřebí připevnit tiskovou platformu, nastavit a seřadit stroj a také přesít hliníkový prášek zbylý z předchozího tisku a naplnit jím zásobník pro tisk. Poté byla spuštěna samotná fáze tisku (viz obr. 9.4), která trvala necelých 46 hod.



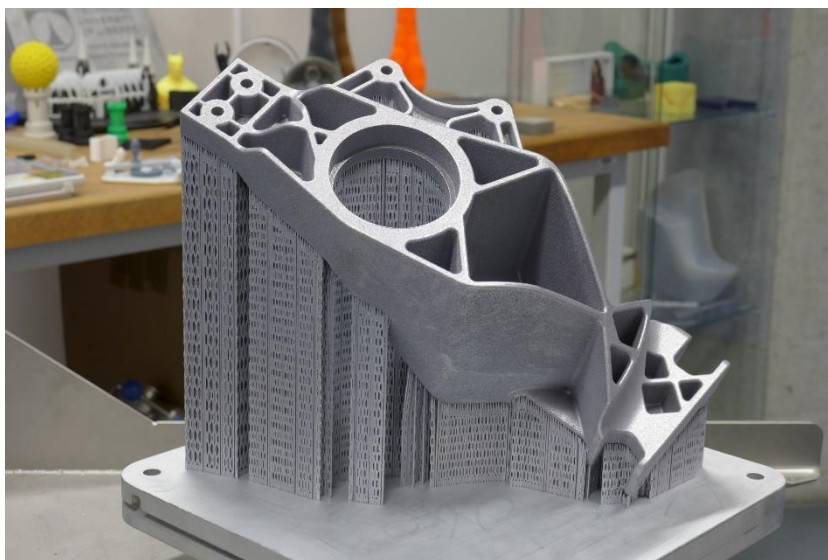
Obr. 9.4: Fáze tisku po cca 20 hodinách

Po dokončení tisku (viz obr. 9.5) bylo provedeno manuální ometení dílce a vyčištění tiskové komory od zbylého prášku. Hliníkový prášek, používaný jako polotovar pro tisk, je velice drahý, proto bylo potřeba provést tuto operaci opravdu pečlivě, aby bylo množství ušetřeného prášku co největší. Až poté bylo možné komoru otevřít a dílec vyjmout.



Obr. 9.5: Těhlice bezprostředně po dokončení tisku

Jakmile byl díl i s platformou vyjmut ze stroje, bylo možné pustit se do fáze Postprocessingu. Tou je v tomto případě myšleno manuální odstranění podpůrného materiálu (viz obr. 9.6). Dále pak, po hrubém začištění povrchu těhlice pilníkem, bylo provedeno opískování v pískovací komoře. Tím bylo docíleno dostatečně kvalitního povrchu (viz obr. 9.7). Tyto operace zabraly dohromady cca 6 hodin.



Obr. 9.6: Těhlice s podpůrným materiálem

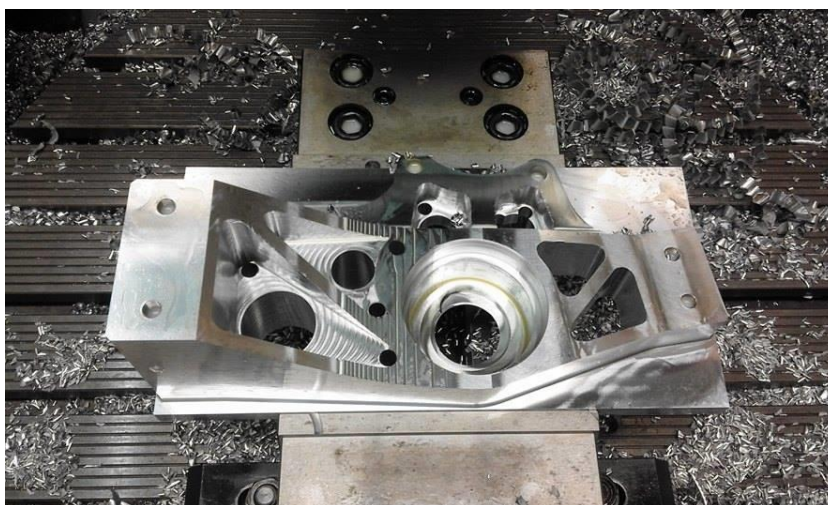


Obr. 9.7: Opískovaná těhlice před obráběním funkčních ploch

Nakonec zbývalo, podobně jako je tomu u odlitků, už jen doobrobit funkční plochy tělesa. Těmi jsou díry pro ložiska a díry pro veškeré šrouby, jak u brzdového třmenu, tak u kulových čepů. Tyto úkony byly přenechány externí firmě. Práce trvala 2 hodiny. Další informace o výrobních časech a ceně jsou uvedeny v tab. 11.I při závěrečném zhodnocení.

9.2 Výroba frézováním

Výroba kompletně frézovaného prototypu zadní těhlice (viz obr. 9.9) byla provedena externí firmou. U výroby (viz obr. 9.8) jsem nebyl fyzicky přítomen a tak mám k dispozici jen omezené informace o výrobních časech a ceně. Na základě CAD modelu (STEP) byl vytvořen program pro CNC obráběcí centrum. Příprava programu zabrala 2 hodiny. Polotovarem byl hliníkový blok z materiálu EN AW 2024. V průběhu obrábění bylo potřeba díl několikrát znovu upnout v jiné pozici. Celkový čas výroby činil 54 hodin.



Obr. 9.8: Rozpracovaný prototyp frézované těhlice



Obr. 9.9: Těleso těhlice po dokončení

Horní a spodní vidlice jsou konstrukčně jednodušší, tudíž nebylo nezbytné pro jejich výrobu použít CNC stroj. Z důvodu ušetření nákladů tak byly vyrobeny na stolové frézce. Obrobení horní vidlice trvalo 3 hodiny, spodní 8 hodin. Další informace o výrobních časech a ceně jsou uvedeny v tab. 11.I při závěrečném zhodnocení.

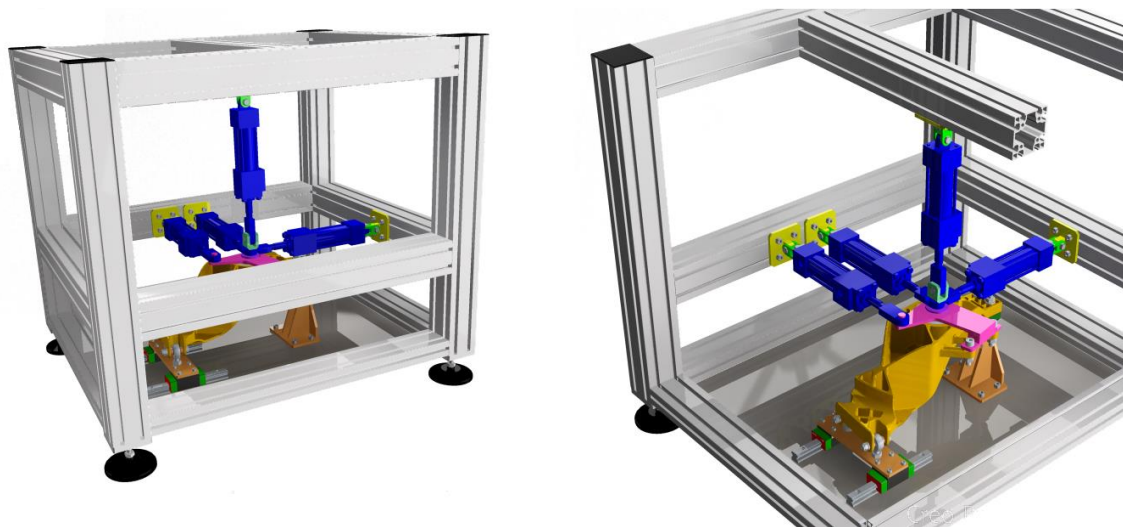
10 Testování mechanických vlastností

10.1 Princip testování

Důležitým bodem mé DP bylo také otestování mechanických vlastností obou vyrobených prototypů a jejich vzájemné porovnání. Jako nejvhodnější se mi jevily dva přístupy:

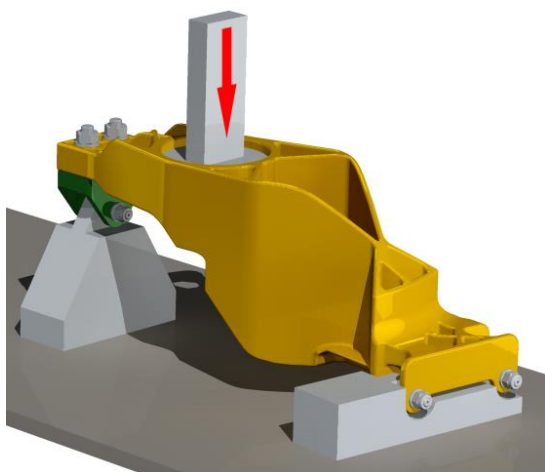
1. Testování na speciálním jednoúčelovém zařízení
2. Testování na trhačce pomocí speciálního přípravku (nedestruktivní)

Pro první ze zmiňovaných možností jsem navrhl „hrubou“ podobu tohoto jednoúčelového zařízení (viz obr. 10.1). Mělo by výhodu v možnosti otestovat prototyp při zatížení hned v několika osách zároveň a tím by se více přibližovalo simulaci jízdních podmínek, na které jsem prototyp navrhoval v začátku praktické části této DP. Vzhledem k výši nákladů a časové náročnosti na výrobu takového zařízení jsem ale nakonec tuto variantu testování zavrhnul.

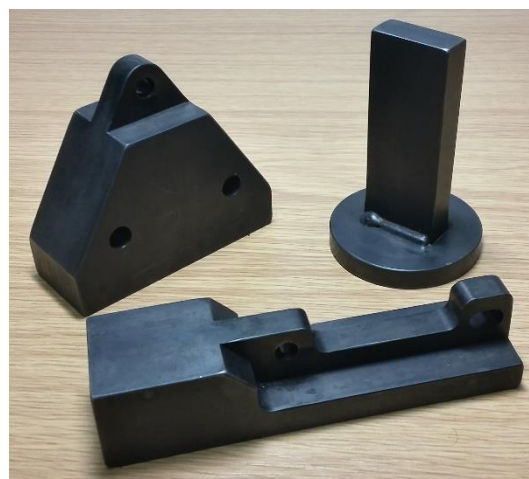


Obr. 10.1: Teoretická podoba jednoúčelového testovacího zařízení

Po konzultaci s panem Ing. Ackermannem z katedry KMP na TUL jsem se rozhodl provést testování prototypů pomocí přípravků (viz obr. 10.2) na trhačce, tzv. tříbodovým testem. Tento princip se jevil jako daleko jednodušší a reálnější. Spočívá jednoosém zatížení těhlice přes díru pro ložiska pomocí přípravku upnutého v horních čelistech trhačky, další dva přípravky slouží jako podpěry umístěné na spodní desce trhačky, přičemž těhlice je k těmto přípravkům upevněna šrouby pro oka kulových čepů (viz obr. 10.3).



Obr. 10.3: Princip třibodového testu

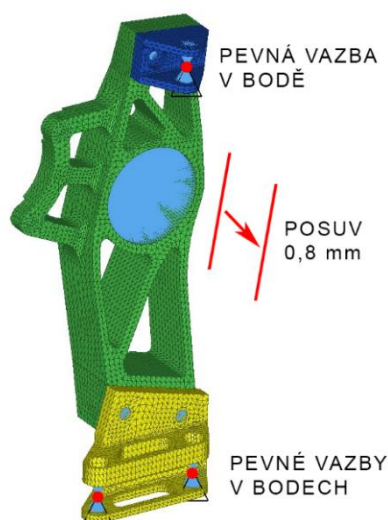


Obr. 10.2: Reálná podoba přípravků

Takto jsou otestovány oba prototypy těhlic, přičemž společným jmenovatelem je předem stanovená míra stlačení (u obou prototypů stejná) a hledanou hodnotou je síla potřebná pro dosažení takového stlačení. Na základě výsledků je poté stanovena tuhost prototypů.

10.2 Průběh testování

Před započítím testů bylo potřeba nejprve zjistit bezpečnou míru stlačení (viz obr. 10.4), při které ani u jednoho z prototypů nedojde k překročení meze pružnosti. Proto jsem provedl několik MKP simulací testu s různými hodnotami stlačení v rozmezí 5 - 0,5 mm. Jako nejvýhodnější se jevila hodnota stlačení 1 mm, u které se napětí v obou modelech blížilo mezi kluzu 300 MPa (fréz. těhlice), resp. 240 MPa (těhlice z 3D tisku) (viz příloha č.5). Z důvodu vyšší bezpečnosti jsem se rozhodl tuto hodnotu ještě snížit na 0,8 mm.



Obr. 10.4: Schéma MKP simulace testu

Samotná fáze testování proběhla v laboratořích budovy G na Technické univerzitě v Liberci. Laboratoř disponuje elektromechanickou trhačkou (viz obr. 10.5). Pro možnost přesného odměřování výchylky (deformace součásti) bylo použito čidlo, proti kterému při průběhu testu tlačil přípravek upnutý v čelistech trhačky (viz obr. 10.6). Byla provedena série testů. I přesto, že plán byl testovat oba díly na stlačení o 0,8 mm, z důvodu bezpečnosti byla počáteční hodnota stlačení snížena na 0,5 mm. Rychlost zatěžování činila 1 mm/min.



Obr. 10.5: Zátěžový test



Obr. 10.6: Odměřování výchylky

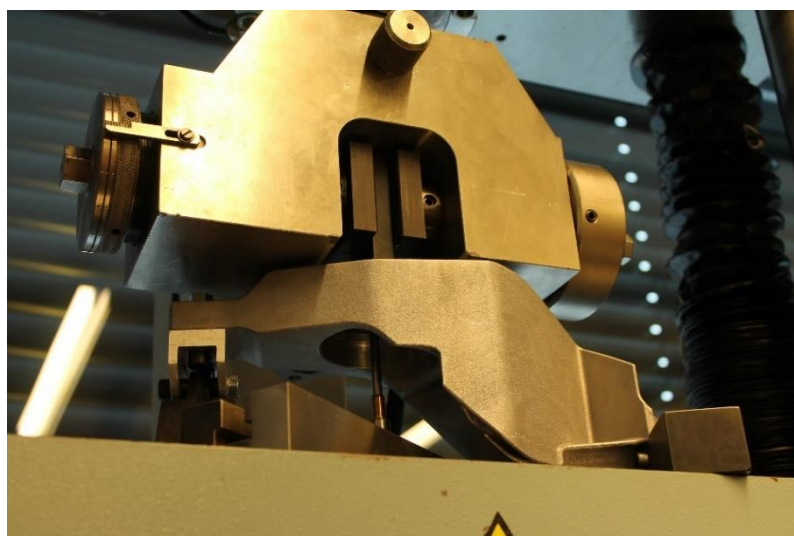
Při zatěžování frézované těhlice (viz obr. 10.7) zprvu rostla výchylka, bez významně rostoucí síly. To bylo zapříčiněno vymezováním všech vůlí v přechodech jednotlivých součástí, šroubových spojích atd. Program ovládající trhačku byl nastaven tuto část do testu

nezahrnovat a samotné měření začalo až po překročení silové hranice 100 N. Výchylka v tu dobu činila necelé 0,2 mm. Následovalo měřené zatěžování s plynule rostoucí silou i výchytkou až do cílové hodnoty 0,5 mm (resp. 0,7 mm při dalších testech), kde byl test zastaven. Bylo provedeno několik opakování testů a všechny proběhly v oblasti pružné deformace.



Obr. 10.7: Zátěžový test frézované těhlice

U těhlice z 3D tisku byl proces vymezení vůlí menší, cca 0,1 mm. Při prvním testu byla jako cíl opět zvolena výchylka 0,5 mm a po jejím dosažení byl test bezpečně ukončen. V následující testu bylo cílem dosáhnout výchytky 0,7 mm. Při přibližování k hodnotě 0,6 mm, však došlo k podezřelému zakolísání zatěžující síly, což mohlo značit přechod do plastické deformace a test byl z důvodu bezpečnosti ihned zastaven. Následně bylo provedeno několik testů na hodnotu 0,6 mm a všechny byly bezpečné.



Obr. 10.8: Zátěžový test těhlice z 3D tisku

10.3 Výsledky testů

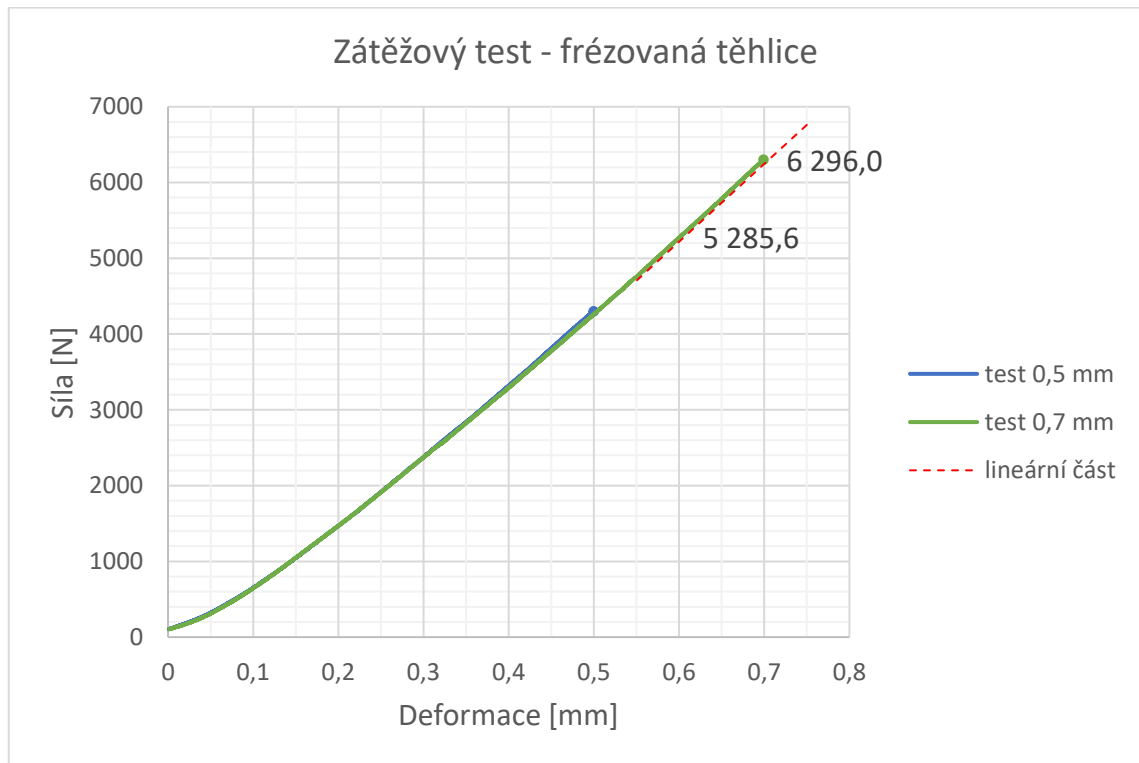
Očekáváním, plynoucím z MKP analýz, bylo, že těhlice z 3D tisku bude, i přes horší materiál, díky sofistikovanější konstrukci tužší než ta frézovaná. Tento předpoklad se reálnými testy potvrdil. Zajímavé také bylo, že průběh zatížení u frézované těhlice je téměř čistě lineární (viz graf 10.1), zatímco průběh zatížení u těhlice z 3D tisku je spíše progresivní (viz graf 10.2). To je dáno právě rozdílnými konstrukcemi obou těhlic. Progresivitu zatížení u těhlice z 3D tisku má na svědomí nejspíše postupné zapojování jednotlivých žeber její konstrukce.

Výpočet tuhosti těhlic z lineární části průběhu u každého grafu:

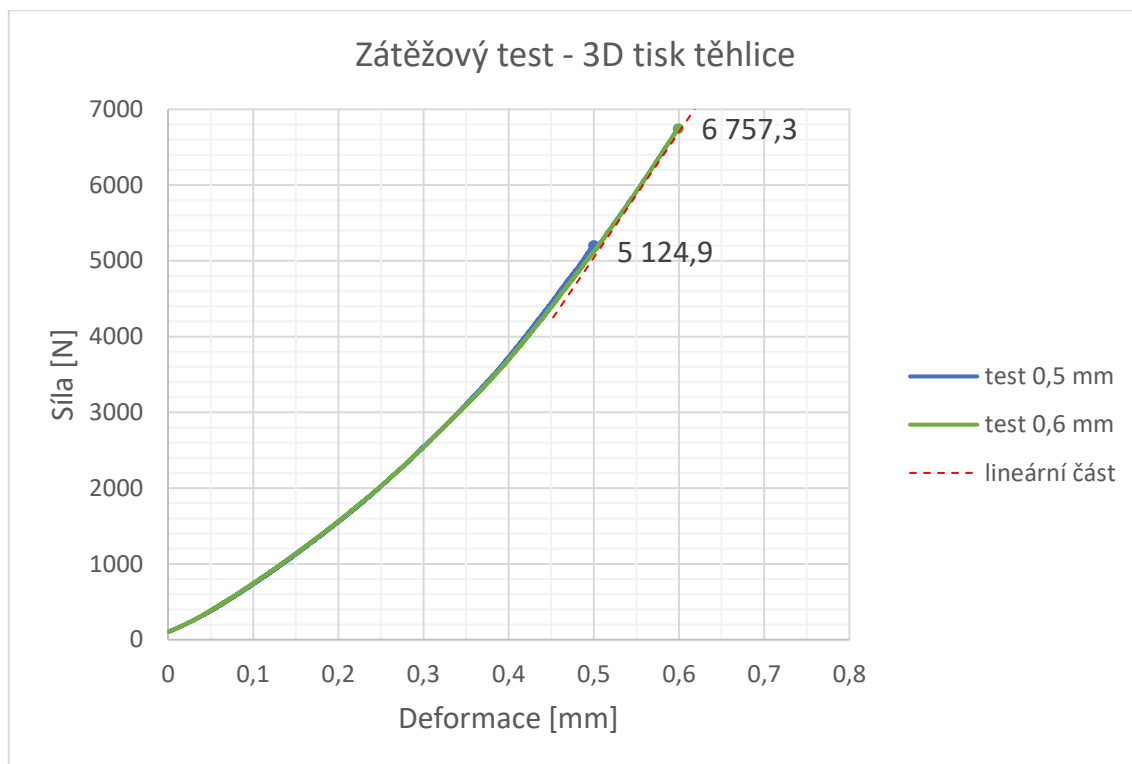
$$\text{frézovaná: } k_f = \frac{\Delta F}{\Delta y} = \frac{(6296,0 - 5285,6)}{0,1} = 10100 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1} \quad (10.1)$$

$$\text{3D tisk: } k_t = \frac{\Delta F}{\Delta y} = \frac{(6757,3 - 5124,9)}{0,1} = 16320 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1} \quad (10.2)$$

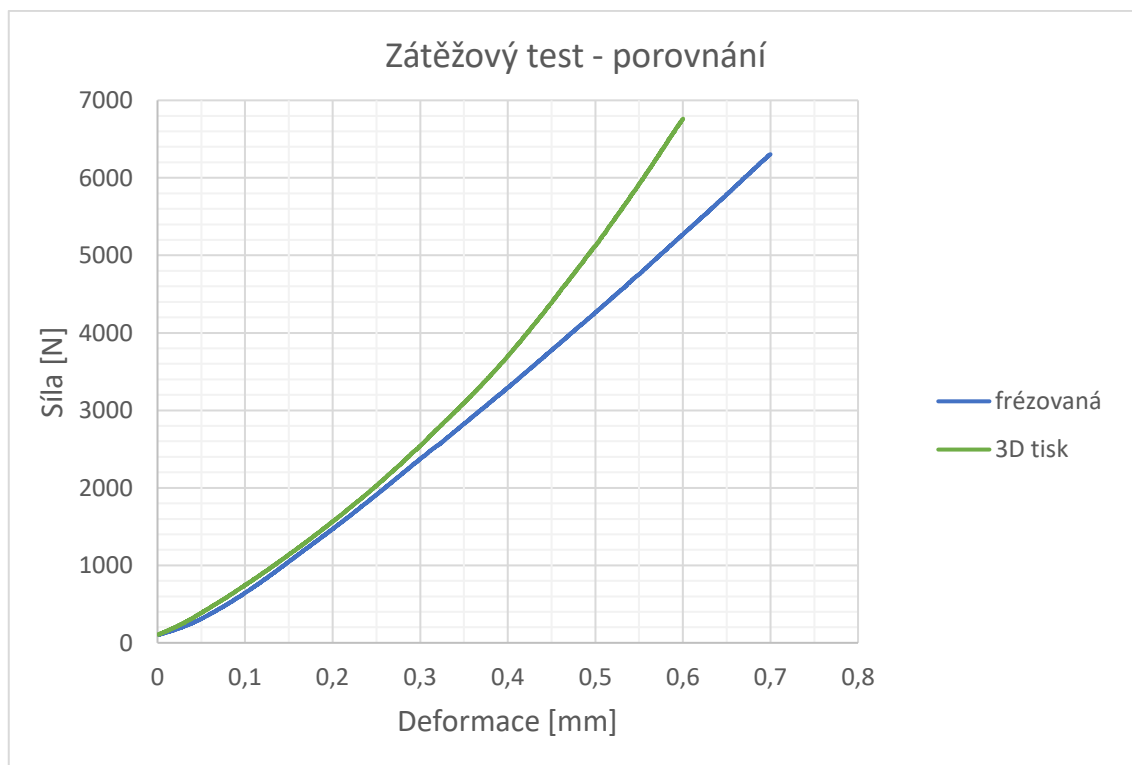
Těhlice z 3D tisku je tedy o 61,6 % tužší, než těhlice frézovaná což se velmi blíží hodnotě předpovídané MKP analýzou



Graf 10.1: Výsledek testu frézované těhlice



Graf 10.2: Výsledek testu těhlice z 3D tisku



Graf 10.3: Porovnání výsledků

11 Zhodnocení prototypů a výrobních technologií

Jedním z hlavních cílů této práce bylo teoreticky i prakticky zjistit, zda se technologie 3D tisku, konkrétně metoda SLM, hodí pro prototypovou výrobu značně namáhaných součástí např. pro menší sportovní vůz kategorie FSAE. Toho bylo docíleno jejím porovnáním s konvenční a v tomto odvětví nejpoužívanější technologií CNC obrábění (resp. frézování), z hlediska mech. parametrů vyrobených prototypů, a dále také dobou a cenou výroby. Výsledek je patrný v tab. 11.I.

Hlavní výhodou použití technologie SLM jsou rozhodně lepší mech. vlastnosti dílu. I přesto, že je vyroben z „horšího“ materiálu, díl je tužší a lehčí než jeho frézovaný konkurent. Na tom má svůj podíl bezesporu i návrh konstrukce pomocí TO, jejíž potenciál se nejlépe využije právě v kombinaci s 3D tiskem. Při více sofistikovanějších TO lze totiž dostat „organický tvar“, který poté jinak, než za pomoci SLM už ani vyrobit nelze. Další výhodou je také o něco kratší doba výroby.

Naopak hlavní nevýhodou metody SLM je cena výroby. Zatímco v oboru CNC obrábění je značná konkurence a zadavatel tak dostává možnost cenu i dobu výroby do značné míry regulovat výběrem těch nejvýhodnějších nabídek, u výroby pomocí SLM je často nucen sáhnout po nabídce za jakoukoliv cenu. Firem, které se touto technologií zabývají je prozatím velmi málo, nemluvě o tom, že hodinová sazba stroje i režijní náklady s výrobou spojené jsou pořád velmi vysoké. Mírně technologie zaostává také ve výrobní přesnosti dílů.

Tab. 11.I: Porovnání mech. vlastností, doby a ceny výroby obou prototypů

Prototyp č.	1	2
Technologie výroby	frézování	3D tisk - SLM
Materiál ($R_{p0,2}$) [MPa]	EN AW 2024 (300)	AlSi12 (240)
Hmotnost [Kg]	1381	1222
Tuhost [kN/m]	10100	16320
Doba výroby [h]	64	57
Náklady na výrobu [Kč]	26000	85000

Lze tedy říci, že technologie SLM je v oboru výroby dílů pro prototypové sportovní vozy vhodným služebníkem u týmů, které už jsou zaběhnuté, mají dostatek zkušeností i dat na vývoj dílů pomocí TO a zároveň mají dostatek financí na realizaci jejich návrhů. Takové týmy pak dokážou potenciál SLM technologie využít naplno.

Nové, méně zaběhnuté týmy, které často bojují s omezeným rozpočtem pravděpodobně pořád raději sáhnou po výrobě dílů CNC obráběním. To je případ i týmu Student Formula TUL působícím na Technické univerzitě v Liberci, který využije frézované těhlice navržené v této práci.



Obr. 11.1: Finální prototypy těhlic

12 Závěr

Tato práce obsahuje zejména dva konstrukční návrhy levé zadní těhlice vozu FSAE, neboli studentské formule. Oba návrhy byly vyrobeny, přičemž první z nich konvenční technologií CNC obrábění za použití materiálu Dural EN AW 2024, druhý moderní technologií SLM (3D tisk) z hliníkového prášku AlSi12. Následně byly prototypy otestovány na elektromechanické trhače nedestruktivním třibodovým testem, což vedlo ke zjištění jejich statické tuhosti. Výsledky testu jsou shrnuty v kapitole 10.3.

Ještě před samotným návrhem těhlic bylo nezbytné vypočítat síly působící na levé zadní kolo, potažmo těhlici, při různých jízdních režimech. Tomu se věnuje kapitola 7. Dále také proběhl návrh kompletní sestavy uložení kola, včetně náboje, ložisek a dalších dílů, bez čehož by nebylo možné s konstrukcí těhlice začít (viz kapitola 8.1). Následně už práce ilustruje konstrukční návrhy jednotlivých variant těhlic, tvořené za použití softwarových nástrojů pro konstrukci (CAD), metodu konečných prvků (CAE), popř. topologickou optimalizaci (TO), na jejímž základě byl vytvořen model pro 3D tisk.

Rešeršní část práce tvoří kapitoly 3 - 6. Nejprve stručně rozebírá koncept mezinárodního univerzitního projektu FSAE, popisuje systémy zavěšení kol u běžných automobilů i závodních vozů, resp. konstrukce těhlic u těchto zavěšení používaných a vysvětluje princip metody SLM, potažmo Rapid Prototypingu jako celku. Nakonec obsahuje uvedení do výpočetních analýz strojních součástí s konkrétnějším zaměřením na metodu konečných prvků (MKP) a topologickou optimalizaci (TO). Tato část práce mi dala potřebný teoretický základ, na kterém se mohly začít rodit nápady pro konstrukční návrhy a jejich řešení.

Důležitou částí práce je také popis výroby prototypů, kde je zachycena realizace obou stěžejních konstrukčních návrhů výše zmíněnými technologiemi výroby. Dále též průběh testování, a zejména zhodnocení vhodnosti použití metody SLM pro výrobu takového prototypu. Zhodnocení je probráno v kapitole 11 a vyplývá z něj, že metoda SLM má ideálně v kombinaci s TO veliký potenciál pro prototypovou výrobu i velmi namáhaných součástí např. u závodních vozů díky tomu, že umožňuje poměrně rychle a kvalitně produkovat konstrukčně složité díly vynikající, i přes horší materiál, svou nízkou hmotností a vysokou tuhostí. Tyto vlastnosti jsou však vykoupěny vysokou cenou výroby, a proto vždy stojí za zvážení, jestli potenciál takového dílu bude vůbec využit a zda se tedy investice vyplatí.

Použití 3D tisknuté těhlice bylo předmětem posuzování i v rámci domácího týmu Student Formula TUL, kde jsme se s kolegy z týmu vzhledem k vysoké ceně rozhodli tuto variantu neaplikovat. Projekt FSAE působí na Technické univerzitě teprve druhým rokem a bojuje s dosti omezeným rozpočtem, proto je v tuto chvíli jeho hlavní prioritou stanovit základ pro budoucí generace tým, že bude postaven první prototypový vůz, jehož jednotlivé prvky se budou vyvíjet až s dalšími a dalšími evolucemi vozu. A na to prozatím bohatě postačují frézované těhlice navržené v této práci, a právě ty budou na voze použity. Nezbyvá tedy než popřát budoucím generacím projektu FSAE na TUL hodně štěstí k rozvoji v dalších letech a doufat, že společně s jejich rostoucími zkušenostmi a současně snižujícími se náklady na 3D tisk, se jednoho dne stane metoda SLM běžně používaným nástrojem pro výrobu dílů na jejich vozy.

Tato práce by nakonec také mohla posloužit jako základ pro další vývoj podobného dílu pomocí TO, jelikož zde byl z časových důvodů proveden pouze jeden cyklus TO, ale pro využití plného potenciálu se vždy provádí několik návazných cyklů. Díky tomu bude možné získat ještě daleko sofistikovanější strukturu dílu, která velmi pravděpodobně povede k dalšímu snižování hmotnosti při zachování stejné nebo velmi podobné tuhosti. Práce za sebou zanechává odkaz v podobě jednotlivých podkladů a souborů, přes metodu návrhu až po fyzické testovací přípravky, které lze opakovaně použít.

Bibliografie

- [1] **SAE International.** 2016 Formula SAE® Rules. *Formula SAE* ©. [Online] [Citace: 02. 05. 2016.] Dostupné z:
http://www.fsaeonline.com/content/2016_FSAE_Rules.pdf.
- [2] **HOFACKER, A.** Live at the Hockenheimring 2014. *ATZ Extra*. Listopad 2014.
- [3] **VLK, F.** *Podvozky motorových vozidel*. Brno : Prof. Ing. František Vlk, DrSc., nakladatelství a vydavatelství, 2006. ISBN: 80-239-6464-X.
- [4] **Exotic Auto Recycling.** *Exotic Auto Recycling*. [Online] [Citace: 18. 11. 2016.] Dostupné z: <http://exoticautorecycling.com/>.
- [5] **Škoda Díly.** *Škoda Díly*. [Online] [Citace: 18. 11. 2016.] Dostupné z:
<http://www.skoda-dily.cz/>.
- [6] **DACKO, B.** Těhlice zadního kola. *Constructorsfl.com*. [Online] [Citace: 09. 05. 2016.] Dostupné z: <http://www.constructorsfl.com/clanky/tehlice-zadniho-kola-382.htm>.
- [7] **OKÁNÍK, F.** *Úprava zavěšení zadního kola formulového vozu*. Brno : Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Ramík, 2014.
- [8] **NOORANI, R.** *Rapid Prototyping: Principles and Applications*. New Jersey : John Wiley & Sons, 2006. ISBN: 0-471-73001-7.
- [9] **KELLER, P.** *3D digitalizace a Reverse Engineering*. Liberec : Výuková prezentace, 2010.
- [10] **SOUKUPOVÁ, L.** *Technologie vytavitelného modelu v současnosti*. Brno : Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc, 2011.
- [11] **HOPKINSON, N.** *Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age*. Chichester : John Wiley & Sons, 2006. ISBN 978-0-470-01613-2.
- [12] **IQ evolution.** Selective Laser Melting I. *IQ evolution*. [Online] [Citace: 15. 05. 2016.] Dostupné z: <http://iq-evolution.com/en/slm-centrum/selective-laser-melting-i>.

- [13] **FUSEK, M., HALAMA, R.** Metoda konečných prvků a metoda hraničních prvků. *Matematika pro inženýry 21. století*. [Online] [Citace: 17. 05. 2016.] Dostupné z: <http://mi21.vsb.cz/modul/metoda-konecných-prvku-metoda-hranicnich-prvku>.
- [14] **KEZ.** Laboratoře. *Katedra energetických zařízení*. [Online] [Citace: 18. 05. 2016.] Dostupné z: <http://www.kez.tul.cz/cs/katedra/laboratore>.
- [15] **Altair Engineering.** *Nápověda SW HyperWorks 14.0*. [Součást SW] Michigan : Altair Engineering, 2016.
- [16] **OZ Racing.** Formula Student. *OZ Racing*. [Online] [Citace: 02. 07. 2016.] Dostupné z: http://www.ozracing.com/images/content/OZ_Formula_Student_Wheels_Program-2016-eng.pdf.
- [17] **AVON Tyres Motorsport.** SAE Formula Student. *AVON Tyres Motorsport*. [Online] [Citace: 02. 07. 2016.] Dostupné z: <http://www.avonmotorsport.com/resource-centre/tyre-applications/sae-formula-student>.
- [18] **Motorkáři.cz.** Manuály pro Suzuki GSX-R 600. *Motorkáři.cz*. [Online] [Citace: 02. 07. 2016.] Dostupné z: <http://www.motorkari.cz/motorkari/?act=manualy-stahnout&s%5Bmotorka%5D=Suzuki%20GSX-R%20600>.
- [19] **BRŮNA, T.** *Brzdový systém formule SAE*. Brno : Vedoucí diplomové práce Ing. Ondřej Blaták, 2009.
- [20] **VLK, F.** *Úlohy z dynamiky motorových vozidel*. Brno : Nakladatelství a zasilatelství VLK, 2001. ISBN 80-238-6574-9.
- [21] **Strojmetal.** Tabulka slitin. *Strojmetal*. [Online] [Citace: 14. 07. 2016.] Dostupné z: <http://www.strojmetal.cz/tabulka-slitin>.
- [22] **Technical F1 Dictionary.** Push-rod - pull-rod. *Technical F1 Dictionary*. [Online] [Citace: 2. 08. 2016.] Dostupné z: http://www.formula1-dictionary.net/pushrod_pullrod.html.

- [23] **ACKERMANN, M., ŠAFKA, J., ZELENÝ, P., LACHMAN, M., KELLER, P.** *Properties of Models Produced by Direct Selective Laser Melting Technology.* Liberec : Applied Mechanics and Materials, 2014. Vol. 693, pp. 231-236.
- [24] **GIBSON, I.** *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing.* New York : Springer, 2010. ISBN 978-1-4419-1119-3.
- [25] **RENISHAW.** Industrial 3D printing yields success on the Formula Student circuits. *RENISHAW.* [Online] [Citace: 17. 05. 2016.] Dostupné z: <http://www.renishaw.com/en/industrial-3d-printing-yields-success-on-the-formula-student-circuits--30314>.
- [26] **Michigan Tech.** Photo Gallery. *Michigan Tech Formula SAE.* [Online] [Citace: 17. 05. 2016.] Dostupné z: <https://sites.google.com/site/michigantechracing/photos>.

Seznam příloh a výkresů

Příloha č.1 - MKP analýza modelu č.1 - var. č.1

Průjezd zatáčkou	1
Prudká akcelerace	2
Prudké brždění	3
Přejezd nerovnosti.....	4

Příloha č.2 - MKP analýza modelu č.1 - var. č.2

Průjezd zatáčkou	1
Prudká akcelerace	2
Prudké brždění	3
Přejezd nerovnosti.....	4

Příloha č.3 - topologická optimalizace modelu č.2

Porovnání variant	1
Porovnání variant	2

Příloha č.4 - MKP analýza modelu č.2

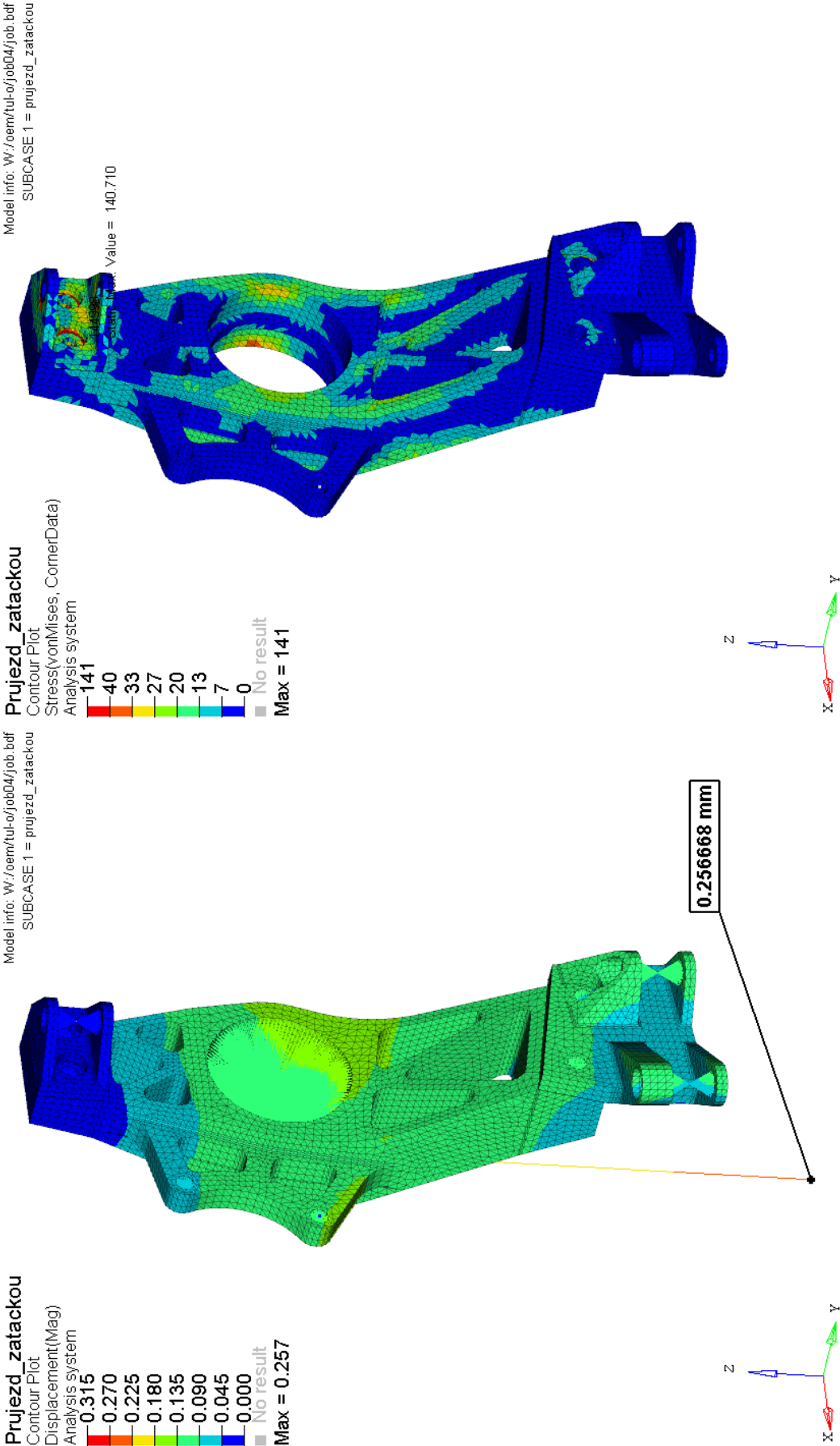
Průjezd zatáčkou	1
Prudká akcelerace	2
Prudké brždění	3
Přejezd nerovnosti.....	4

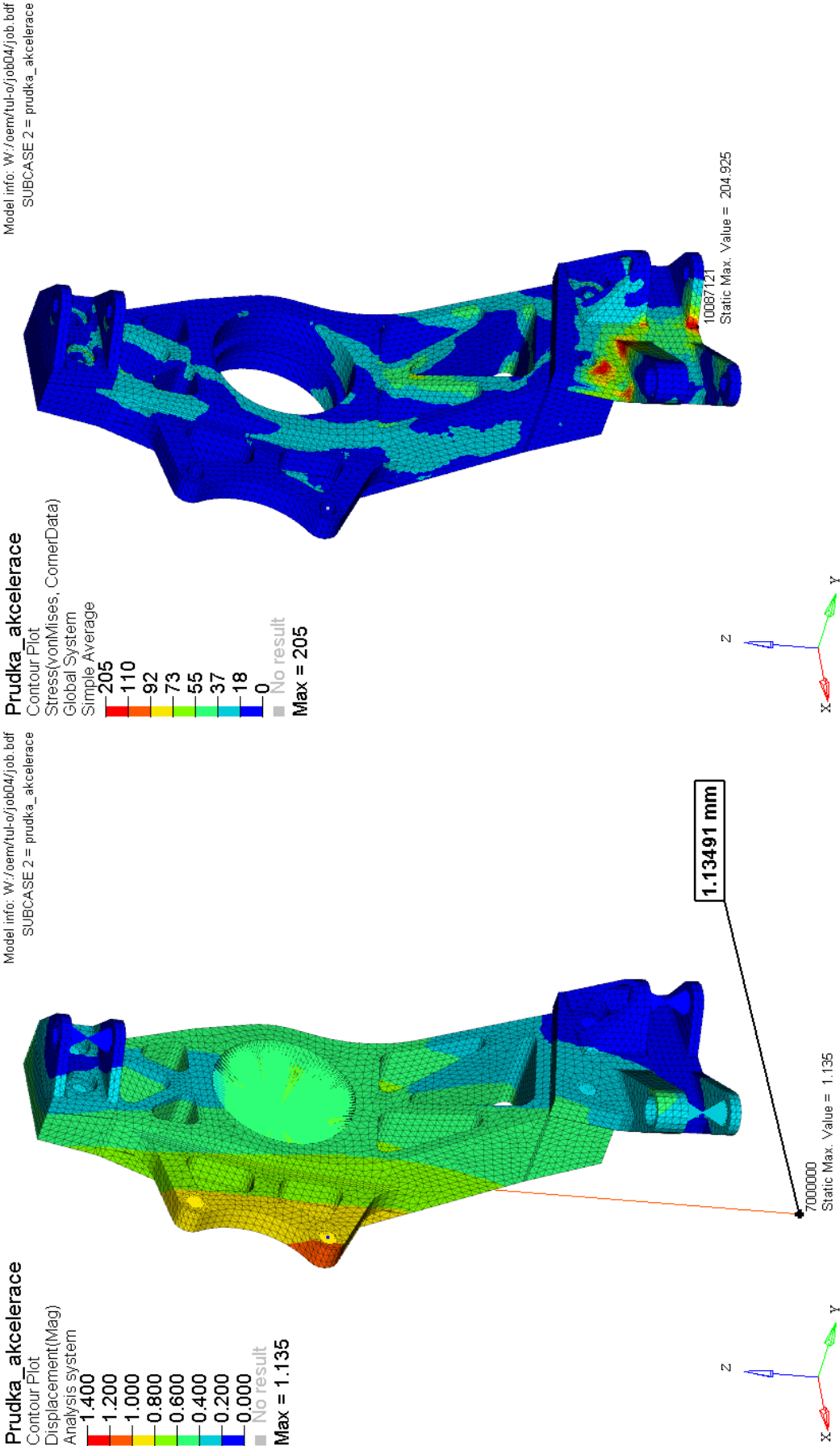
Příloha č.5 - simulace zátěžového testu

Frézovaná těhlice	1
Těhlice z 3D tisku	2

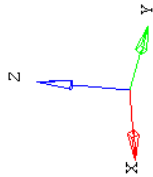
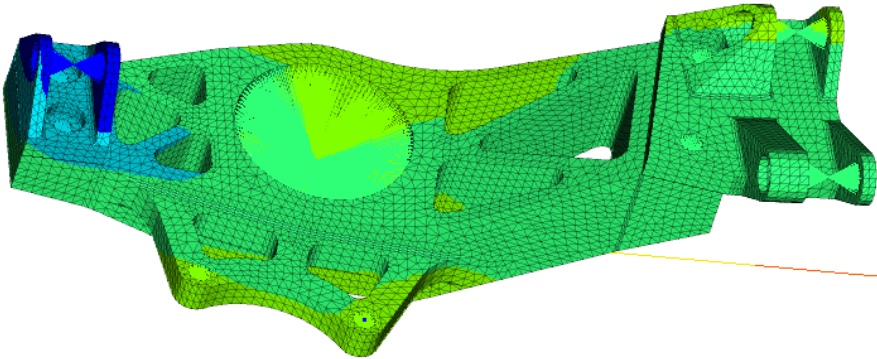
Příloha č.6 - souřadnice kinematických bodů

Příloha č.7 - výkresová dokumentace



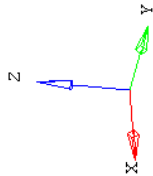
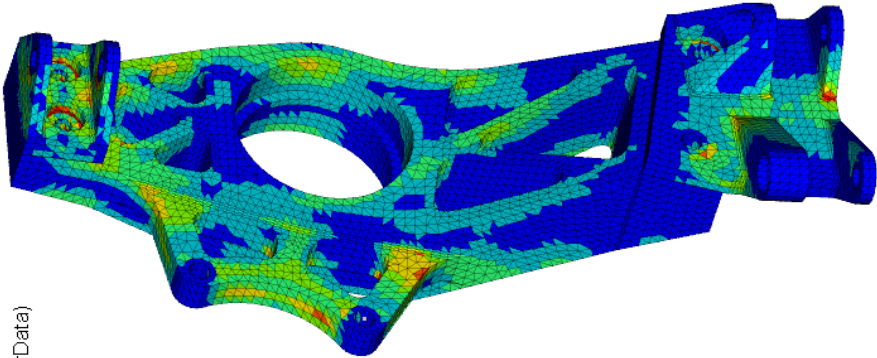


Prudke brzdeni
Contour Plot
Displacement(Mag)
Analysis system
0.700
0.600
0.500
0.400
0.300
0.200
0.100
0.000
No result
Max = 0.557

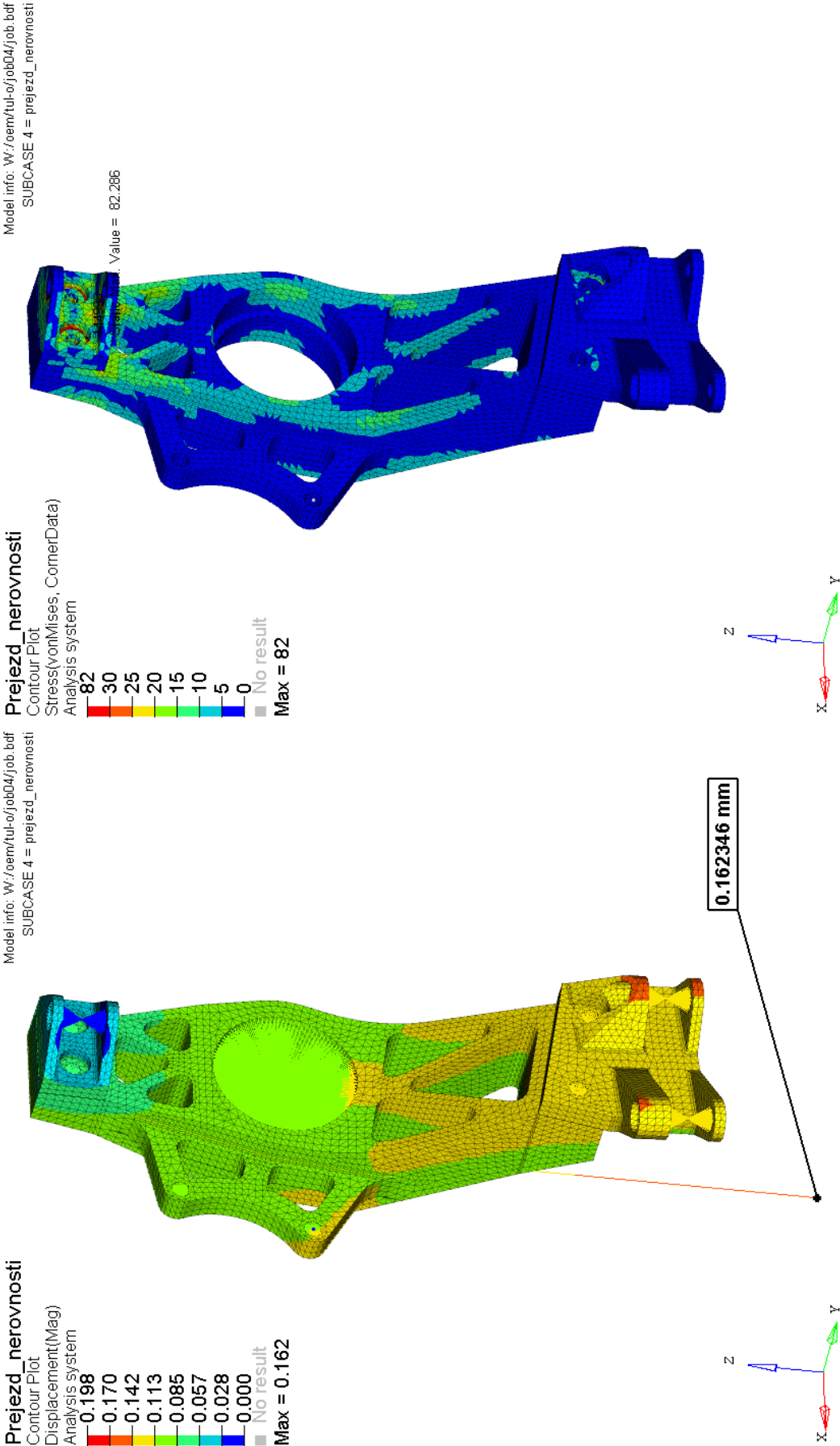


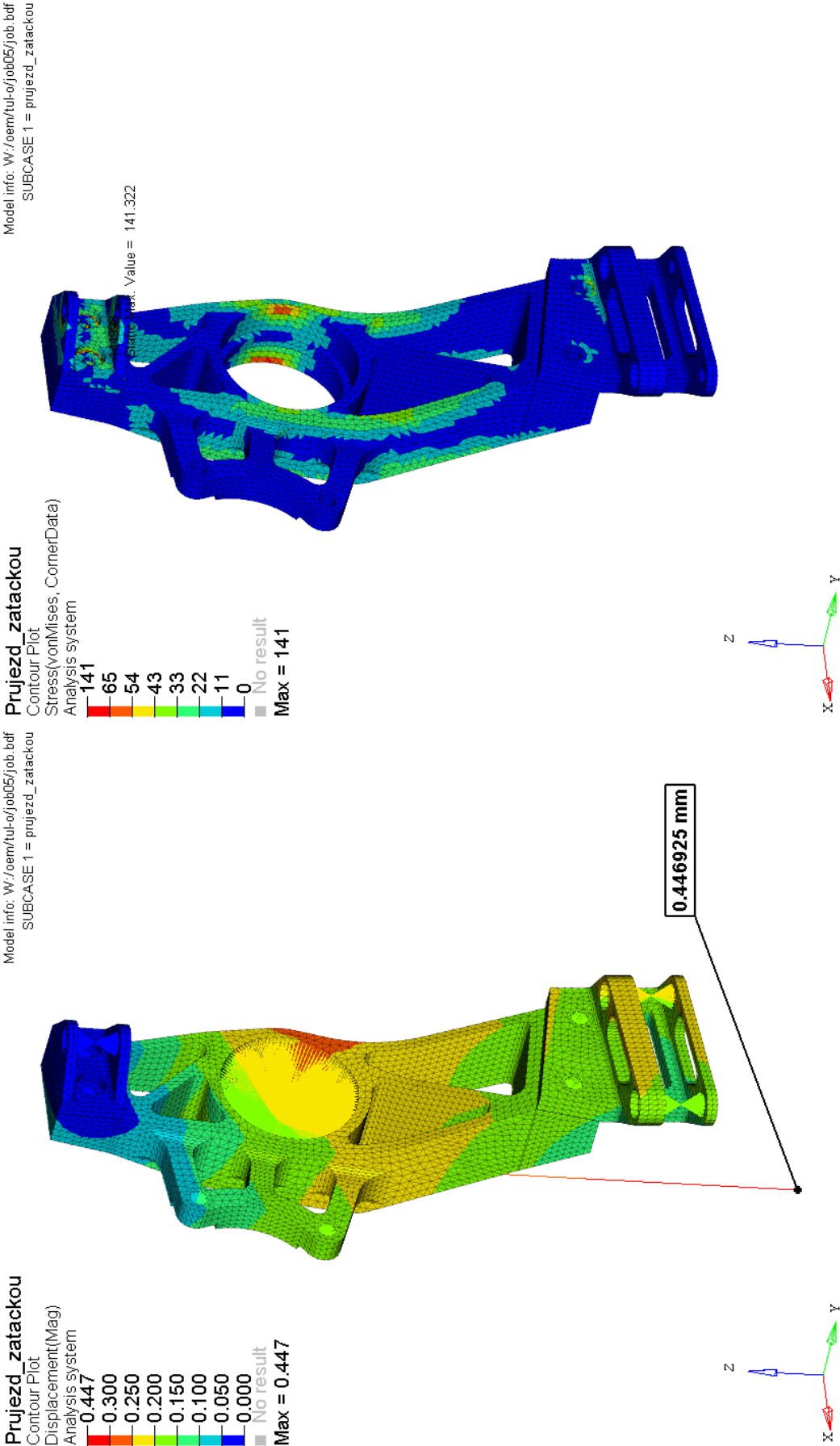
Model info: W:/oem/tul-o/job04/job.bdf
SUBCASE 3 = prudke_brzdeni

Prudke brzdeni
Contour Plot
Stress(vonMises, CornerData)
Analysis system
179
55
46
37
28
18
9
0
No result
Max = 179



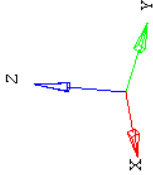
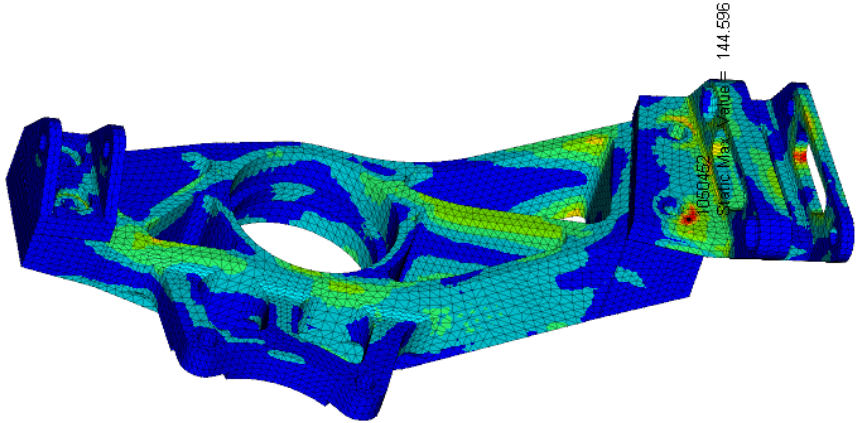
0.557233 mm





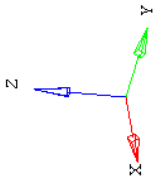
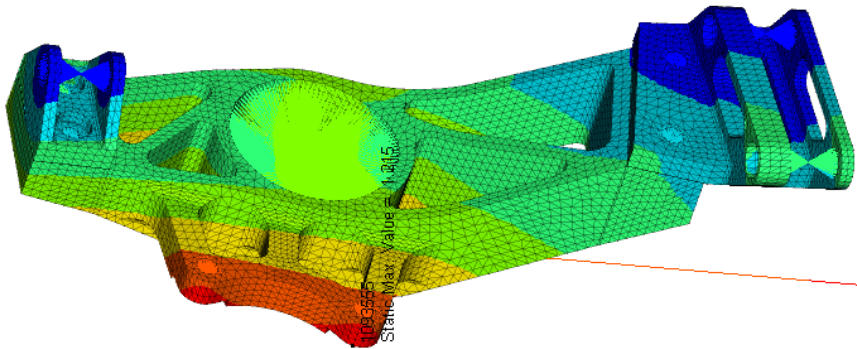
Model info: W:/oem/tul-o/ job05/job.bdf
SUBCASE 2 = prudka_akcelarace

Prudka_akcelarace
Contour Plot
Stress(vonMises, CornerData)
Global System
Simple Average
145
100
83
67
50
33
17
0
No result
Max = 145



Model info: W:/oem/tul-o/ job05/job.bdf
SUBCASE 2 = prudka_akcelarace

Prudka_akcelarace
Contour Plot
Displacement(Mag)
Analysis system
1.215
1.150
0.958
0.767
0.575
0.383
0.192
0.000
No result
Max = 1.215

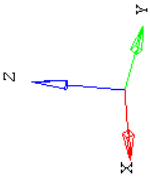
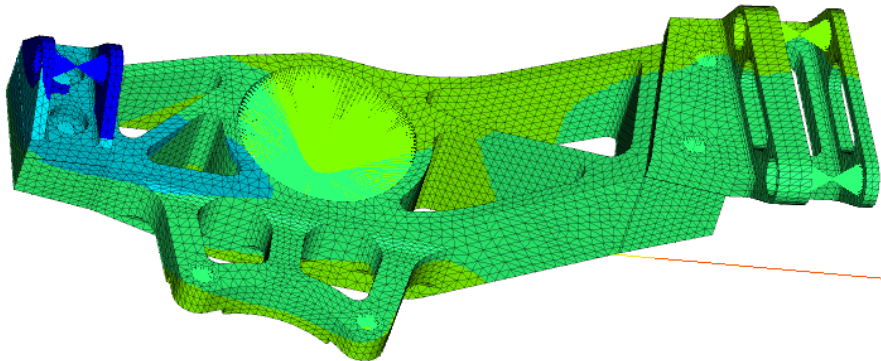


1.15983 mm

Prudke brzdeni
Contour Plot
Displacement(Mag)
Analysis system

0.933
0.800
0.667
0.533
0.400
0.267
0.133
0.000
No result

Max = 0.797

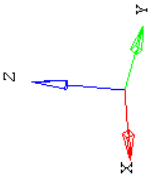
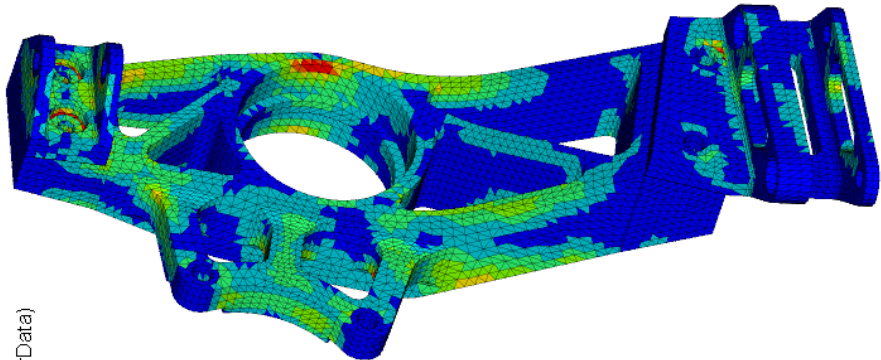


Model info: W:/oem/tul-o/job05/job.bdf
SUBCASE 3 = prudke_brzdeni

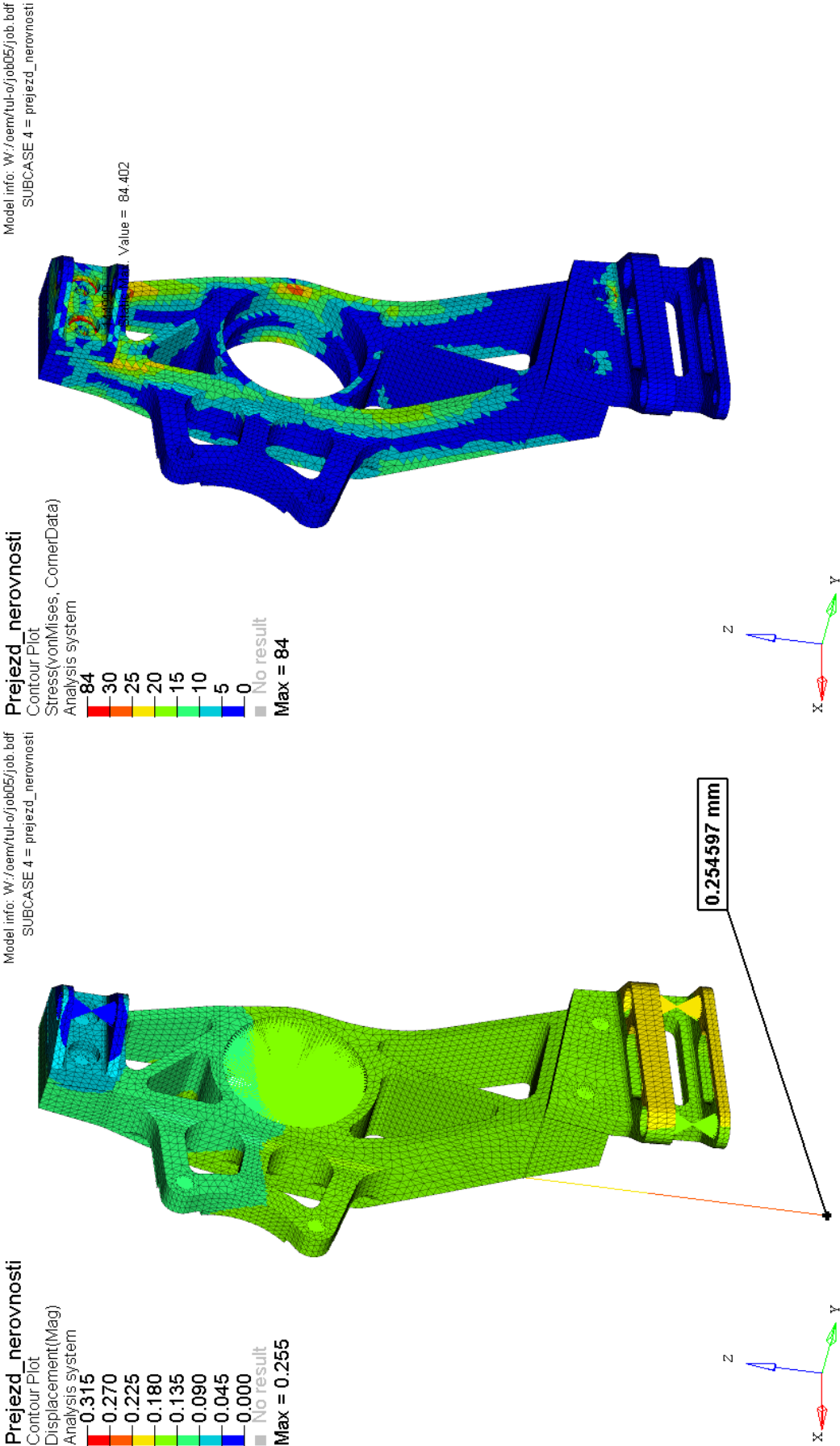
Prudke brzdeni
Contour Plot
Stress(vonMises, CornerData)
Analysis system

183
70
58
47
35
23
12
0
No result

Max = 183



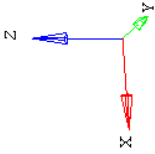
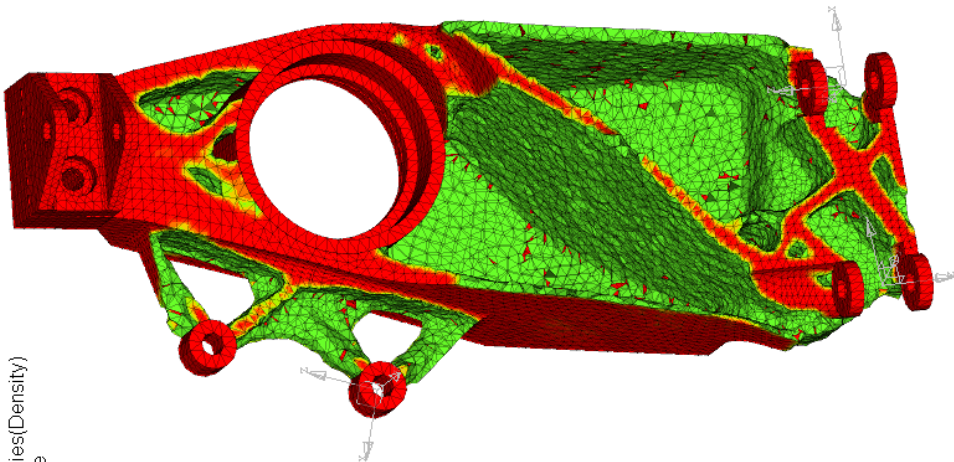
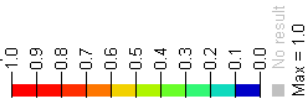
Model info: W:/oem/tul-o/job05/job.bdf
SUBCASE 3 = prudke_brzdeni



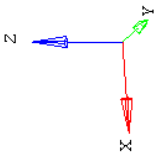
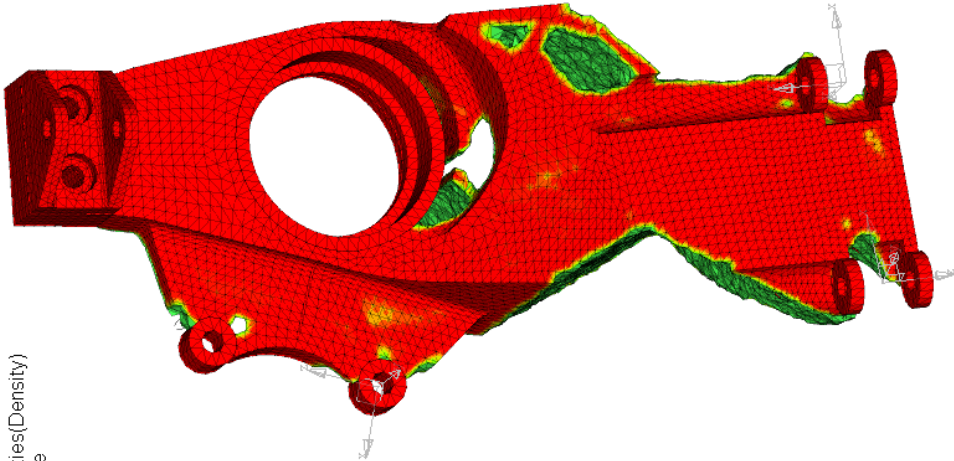
Path: W:/oem/tul-o/opti-05
Result: tehlice_tisk_complete_des.h3d
Iteration 43

Path: W:/oem/tul-o/opti-06
Result: tehlice_tisk_complete_des.h3d
Iteration 31

Varianta_1
Contour Plot
Element Densities(Density)
Simple Average



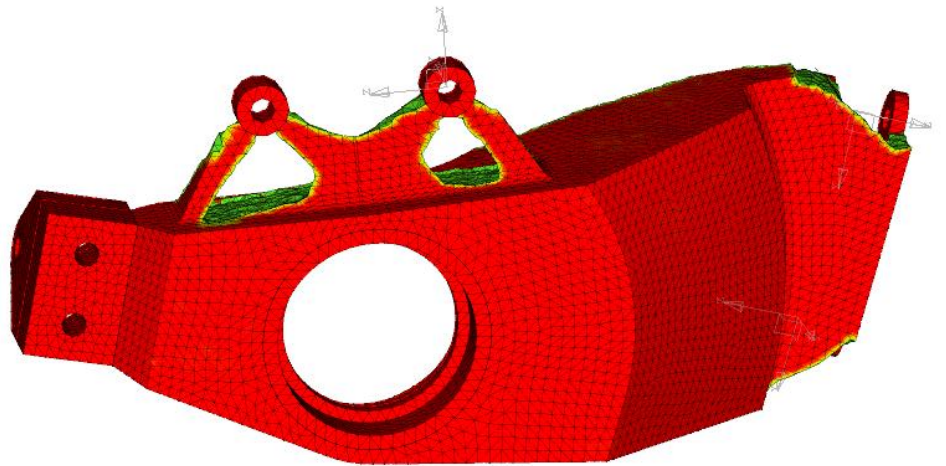
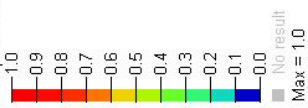
Varianta_2
Contour Plot
Element Densities(Density)
Simple Average



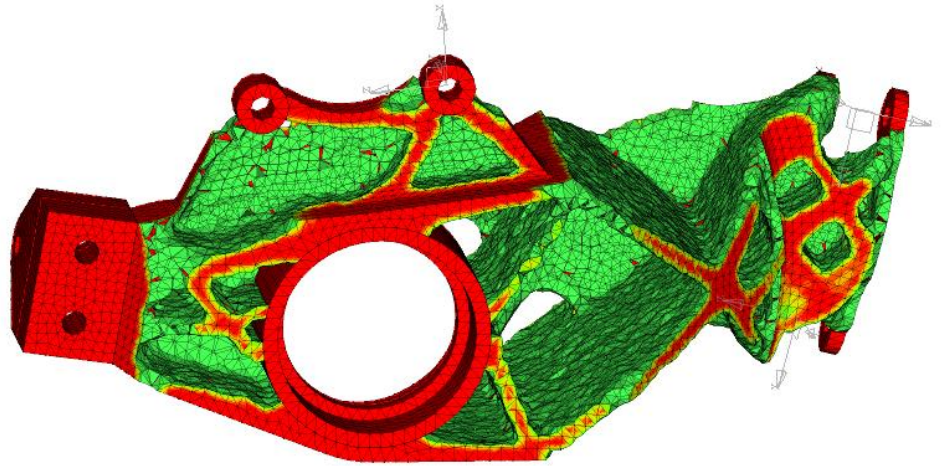
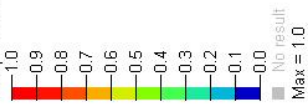
Path: W:/oem/tul- α /opt-05
Result: tehlice_tisk_complete_des.h3d
Iteration 43

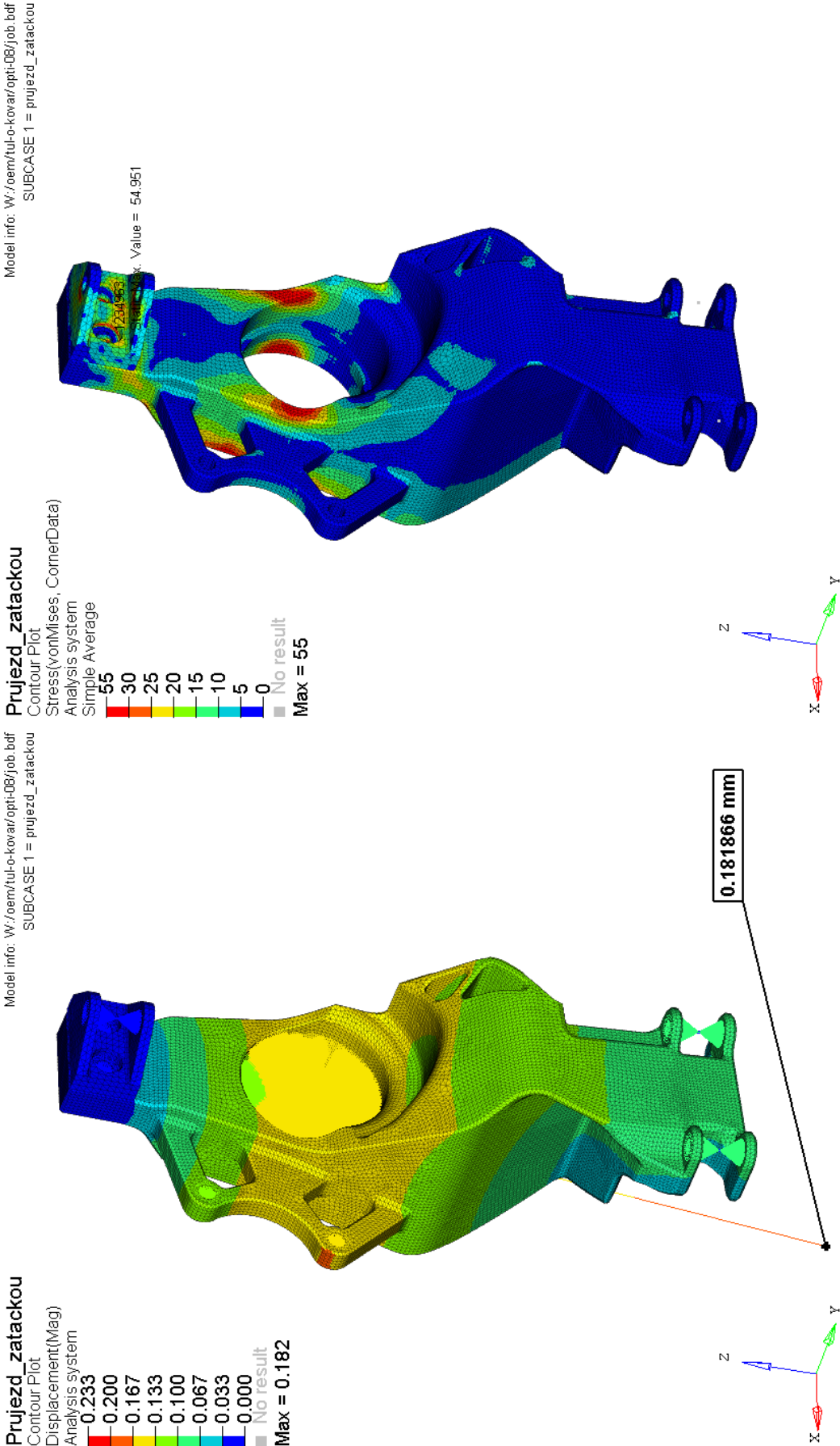
Path: W:/oem/tul- α /opt-06
Result: tehlice_tisk_complete_des.h3d
Iteration 31

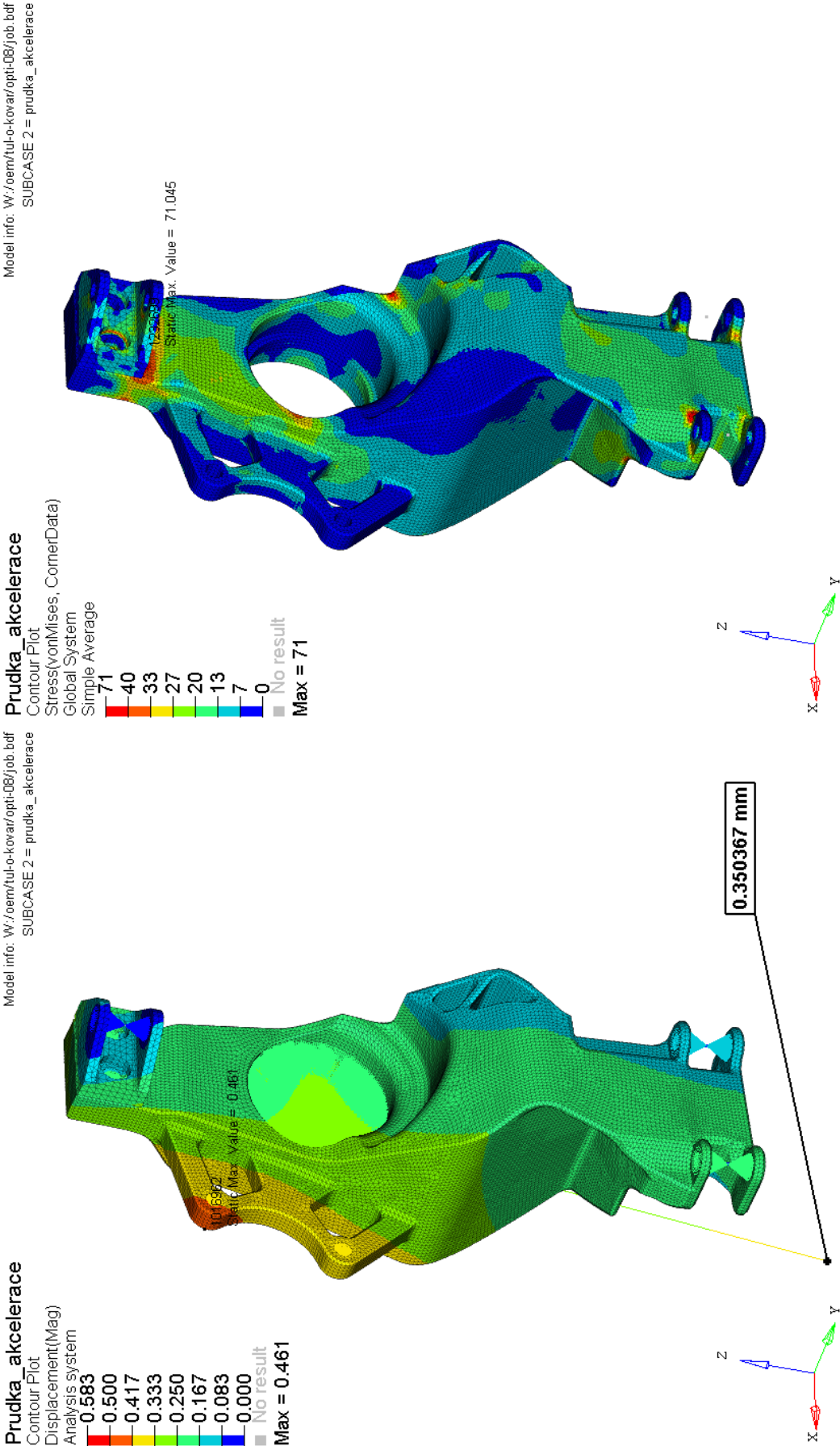
Varianta_1
Contour Plot
Element Densities(Density)
Simple Average



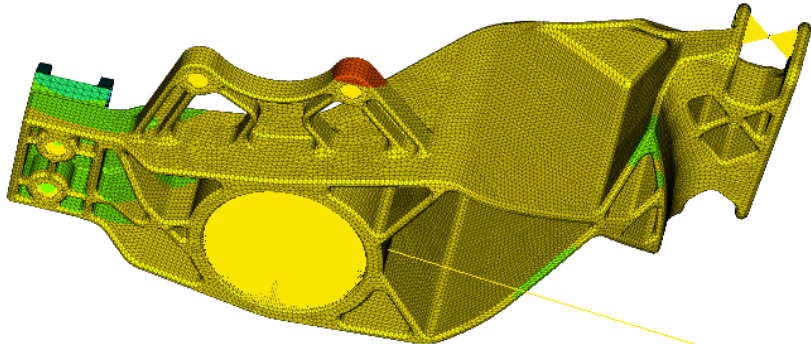
Varianta_2
Contour Plot
Element Densities(Density)
Simple Average





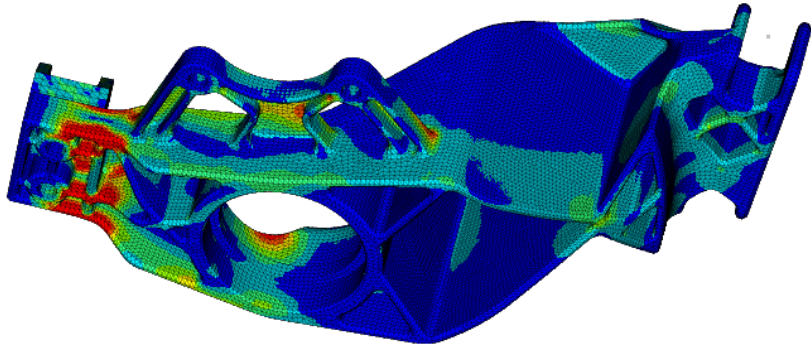


Prudke brzdeni
Contour Plot
Displacement(Mag)
Analysis system
Simple Average
0.443
0.380
0.317
0.253
0.190
0.127
0.063
0.000
No result
Max = 0.334

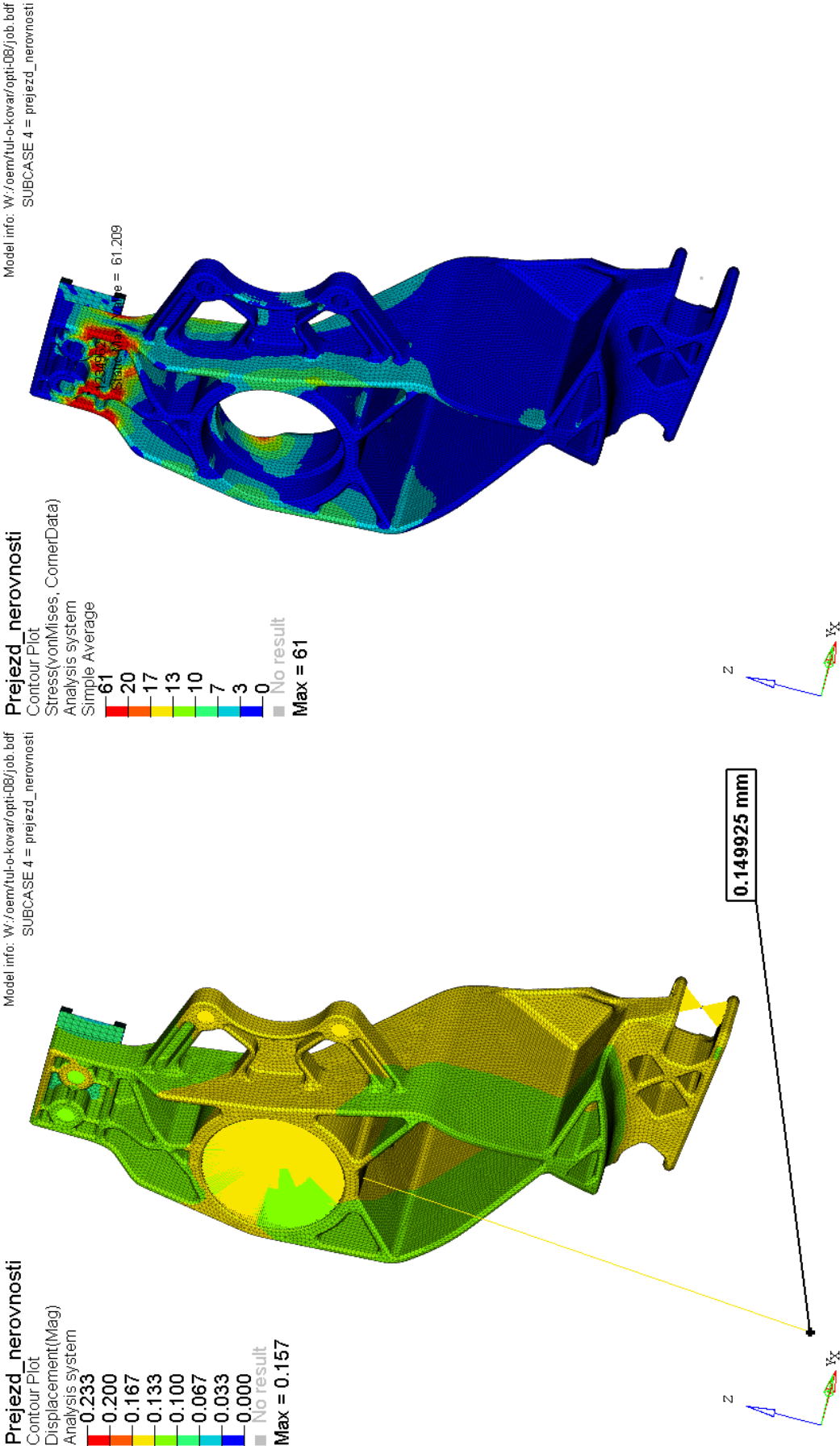


Model info: W:/oem/tul-o-kovar/opti-08/job.bdf
SUBCASE 3 = prudke_brzdeni

Prudke brzdeni
Contour Plot
Stress(vonMises, CornerData)
Analysis system
Simple Average
125
35
29
23
18
12
6
0
No result
Max = 125



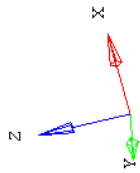
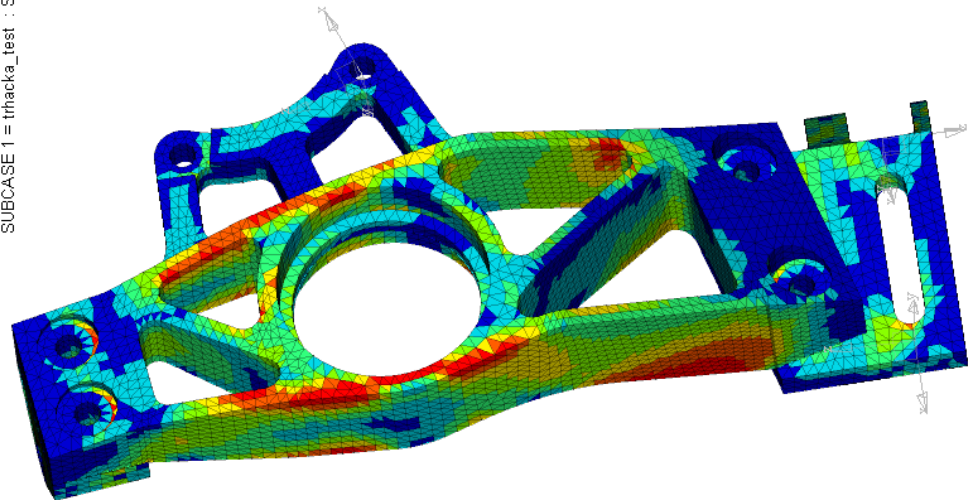
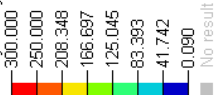
0.333828 mm



1: N:/My Documents/thracka_test_1mm/job.bdf
SUBCASE 1 = thracka_test : Simulation 1 : Frame 0

Zatezovy test_1mm

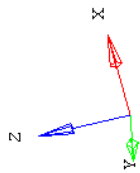
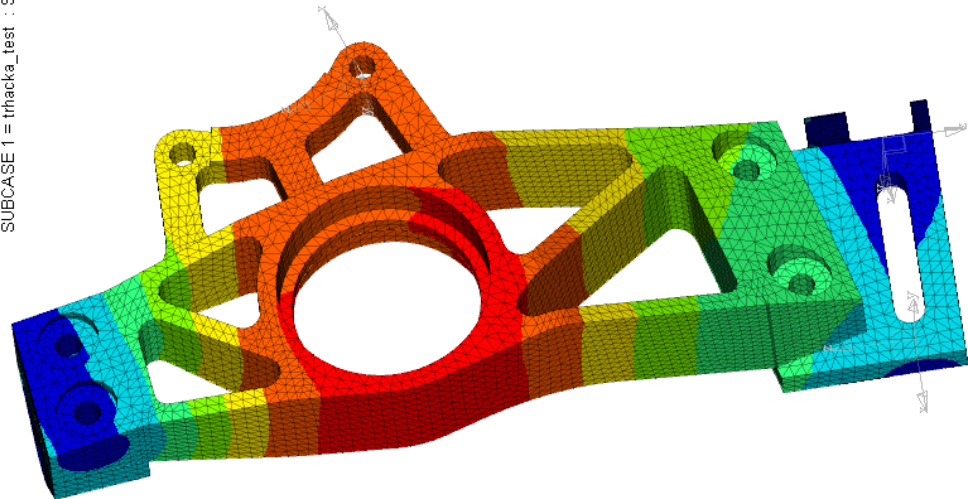
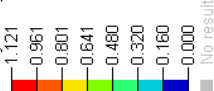
Contour Plot
Stress(vonMises)
Analysis system



1: N:/My Documents/thracka_test_1mm/job.bdf
SUBCASE 1 = thracka_test : Simulation 1 : Frame 0

Zatezovy test_1mm

Contour Plot
Displacement(Mag)
Analysis system



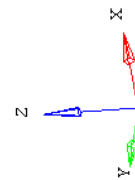
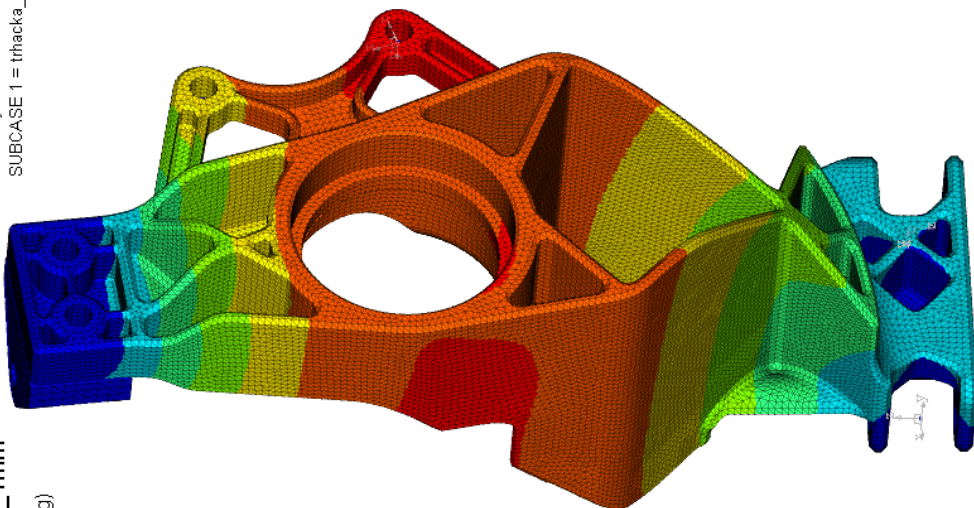
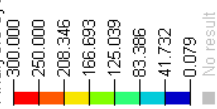
1: N:\My Documents\thacka_test_opti_1mm\job.bdf
SUBCASE 1 = thacka_test : Simulation 1 : Frame 0

Zatezovy_test_1mm

Contour Plot

Stress(vonMises)

Analysis system

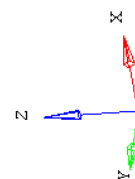
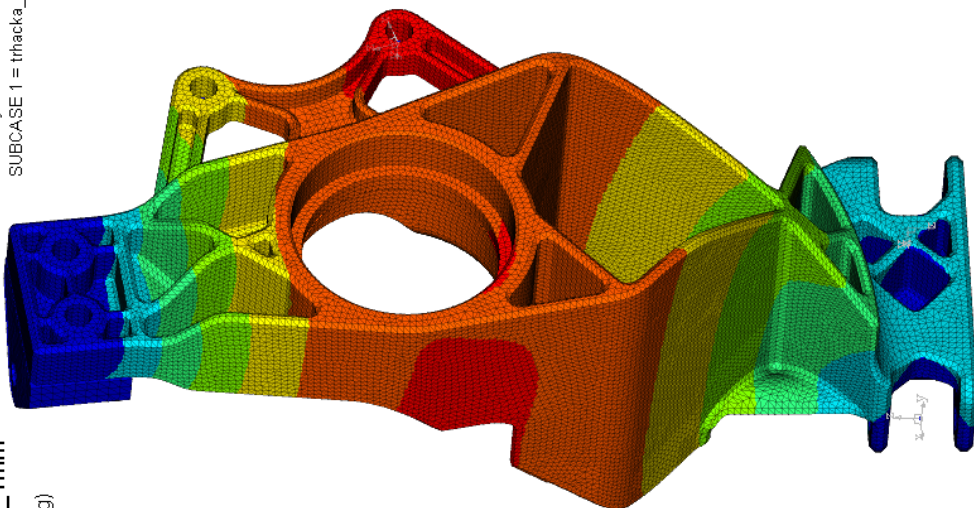
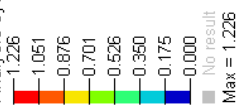


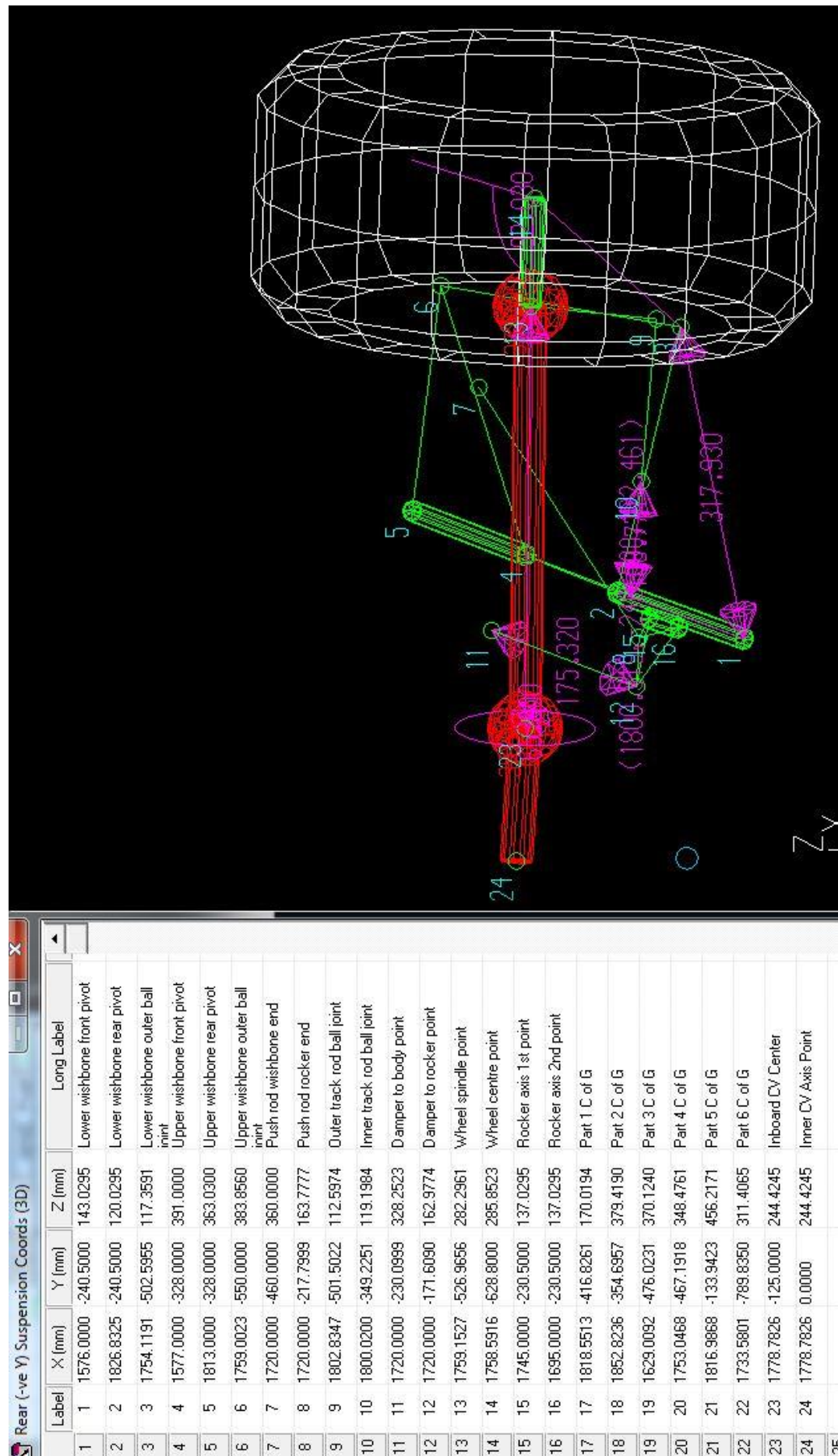
Zatezovy_test_1mm

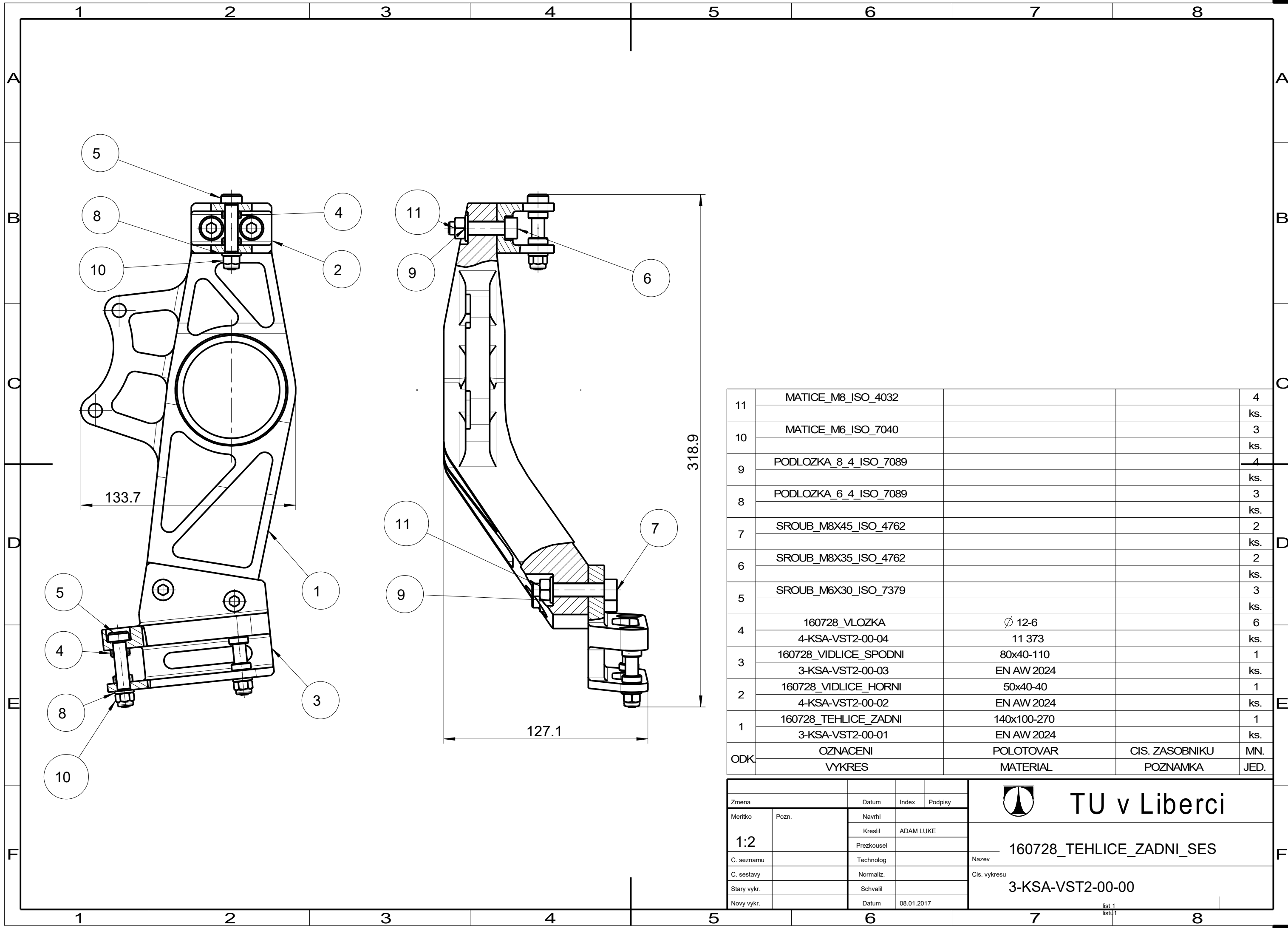
Contour Plot

Displacement(Mag)


Analysis system

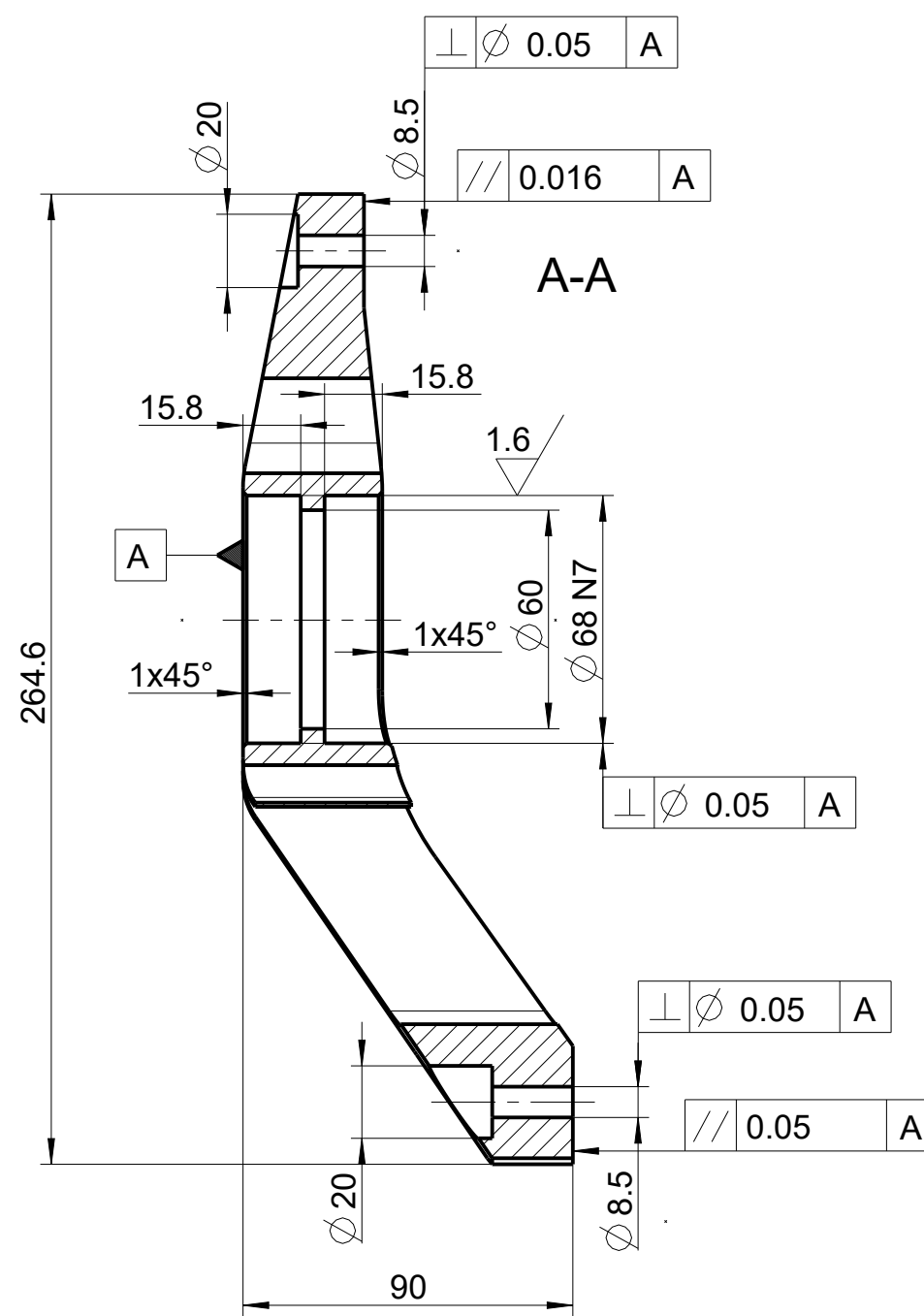
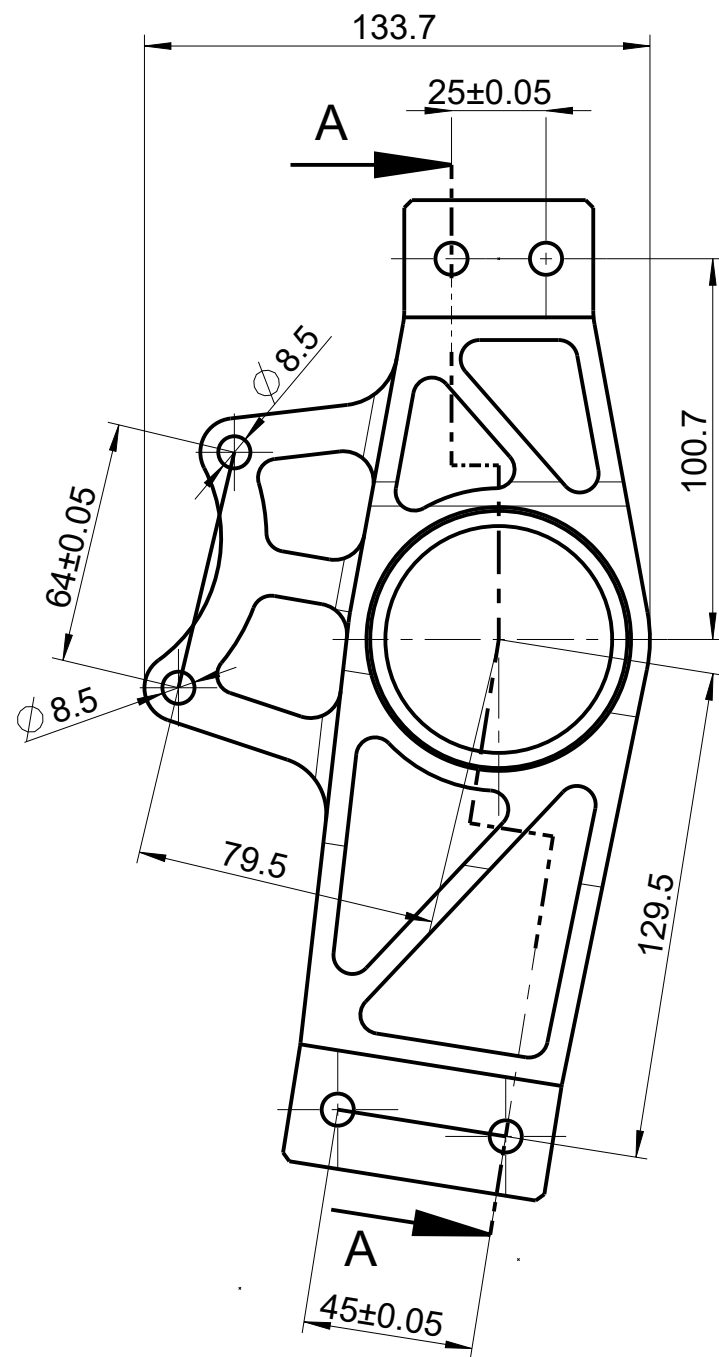






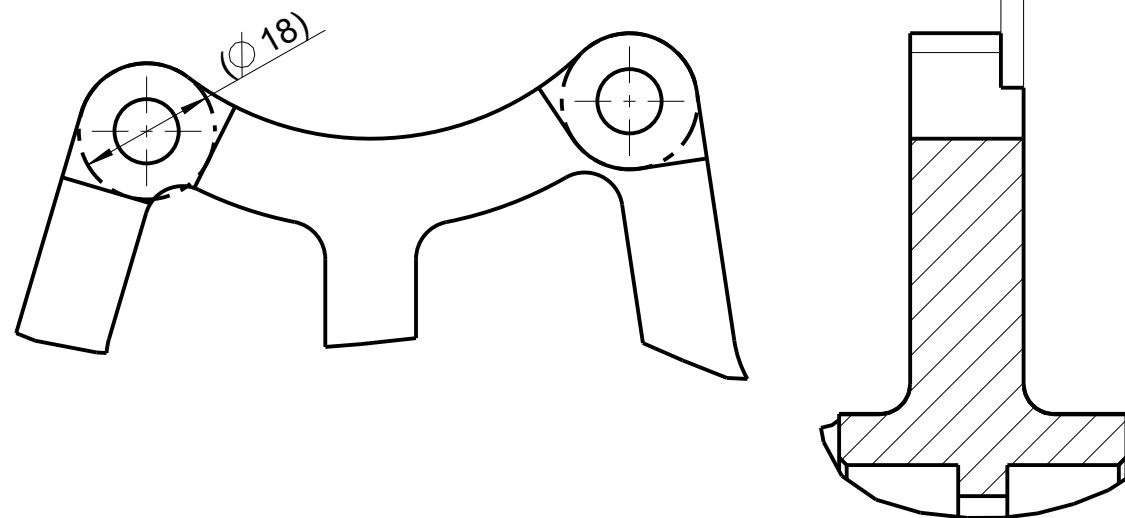
11	MATICE_M8_ISO_4032			4
				ks.
10	MATICE_M6_ISO_7040			3
				ks.
9	PODLOZKA_8_4_ISO_7089			4
				ks.
8	PODLOZKA_6_4_ISO_7089			3
				ks.
7	SROUB_M8X45_ISO_4762			2
				ks.
6	SROUB_M8X35_ISO_4762			2
				ks.
5	SROUB_M6X30_ISO_7379			3
				ks.
4	160728_VLOZKA	Ø 12-6		6
	4-KSA-VST2-00-04	11 373		ks.
3	160728_VIDLICE_SPODNI	80x40-110		1
	3-KSA-VST2-00-03	EN AW 2024		ks.
2	160728_VIDLICE_HORNI	50x40-40		1
	4-KSA-VST2-00-02	EN AW 2024		ks.
1	160728_TEHLICE_ZADNI	140x100-270		1
	3-KSA-VST2-00-01	EN AW 2024		ks.
ODK	OZNACENI	POLOTOVAR	CIS. ZASOBNIKU	MN.
	VYKRES	MATERIAL	POZNAMKA	JED.

				 TU v Liberci	
Zmena		Datum	Index		Podpisy
Meritko	Pozn.	Navrhl			
		Kreslil	ADAM LUKE		
		Prezkousel			
1:2					
C. seznamu		Technolog		Nazev	
C. sestavy		Normaliz.		Cis. vykresu	
Stary vykr.		Schvalll		3-KSA-VST2-00-00	
Novy vykr.		Datum	08.01.2017	list 1	




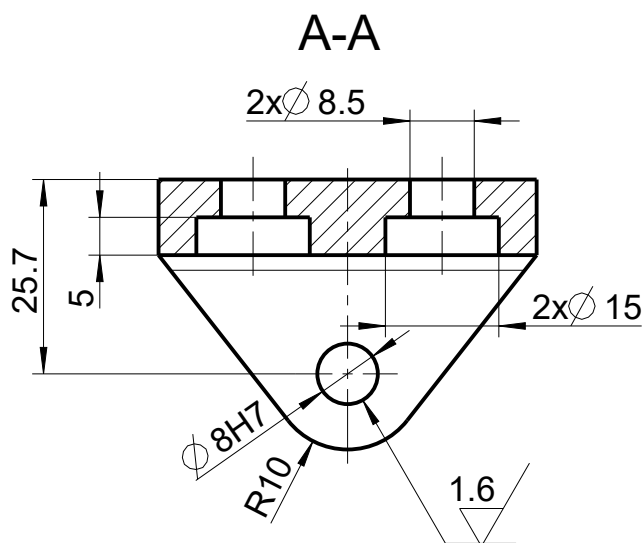
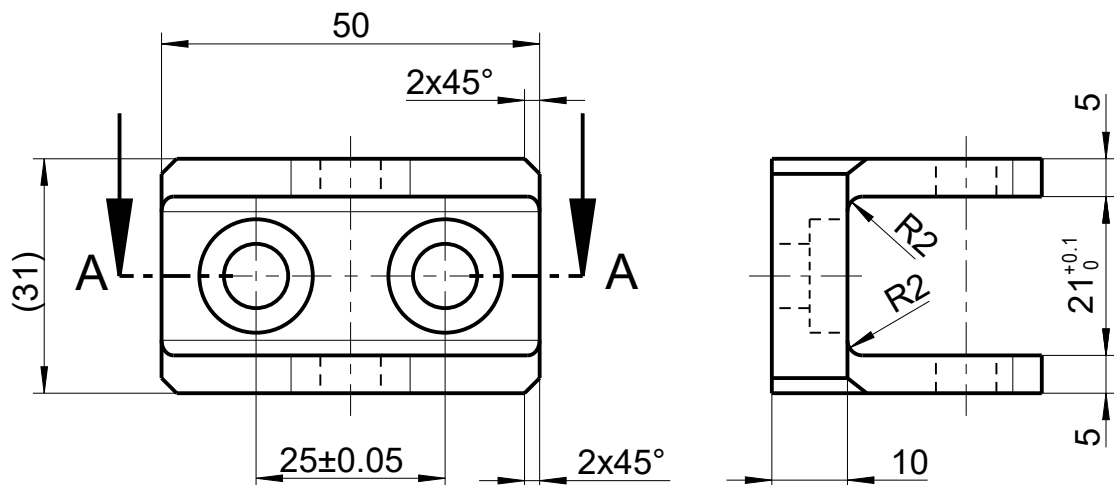
6.3 (✓)

UCHYT TRMENU BRZDY Z DRUHE STRANY 3




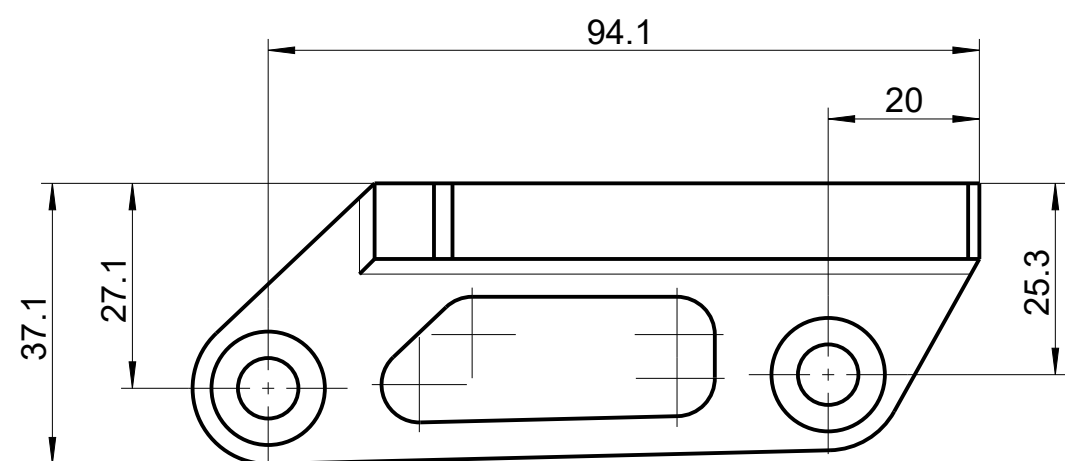
VSECHNY HRANY ODJEHLIT
ZAKOTOVANY POUZE FUNKCNI ROZMERY (DIL BUDE VYRABEN NA CNC)


Roz. -Polot.		140x100-270				Presnost			
		c)		Mater.	EN AW 2024	Tr. odp		Tolerovani ISO 2768-mK	
		b)		C. hm	0.909 kg	Hr. hm.			
		a)							
Zmena		Datum	Index	<div> TU v Liberci</div> <div>160728_TEHLICE_ZADNI</div> <div>Cis. vykresu</div> <div>3-KSA-VST2-00-01</div> <div>listu1</div> <div>list 1</div>					
Meritko	Pozn.	Navrhl							
1:1		Kreslil	ADAM LUKE						
		Prezkousel							
	C. seznamu	Technolog							
C. sestavy	KSA-DP-17-00-00	Normaliz.							
Stary vykr.		Schvalil							
Novy vykr.		Datum	08.01.2017						

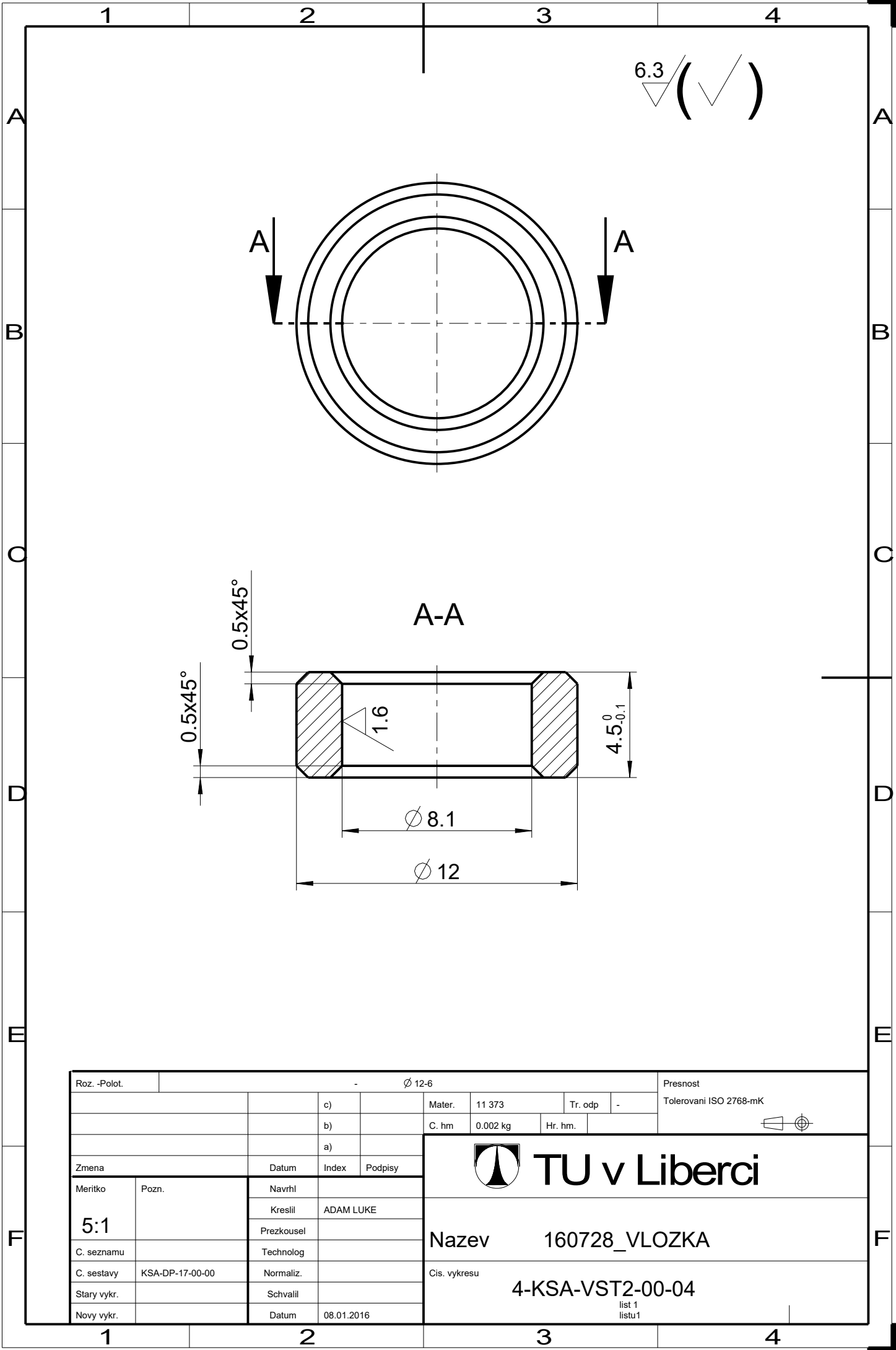



VSECHNY HRANY ODJEHLIT

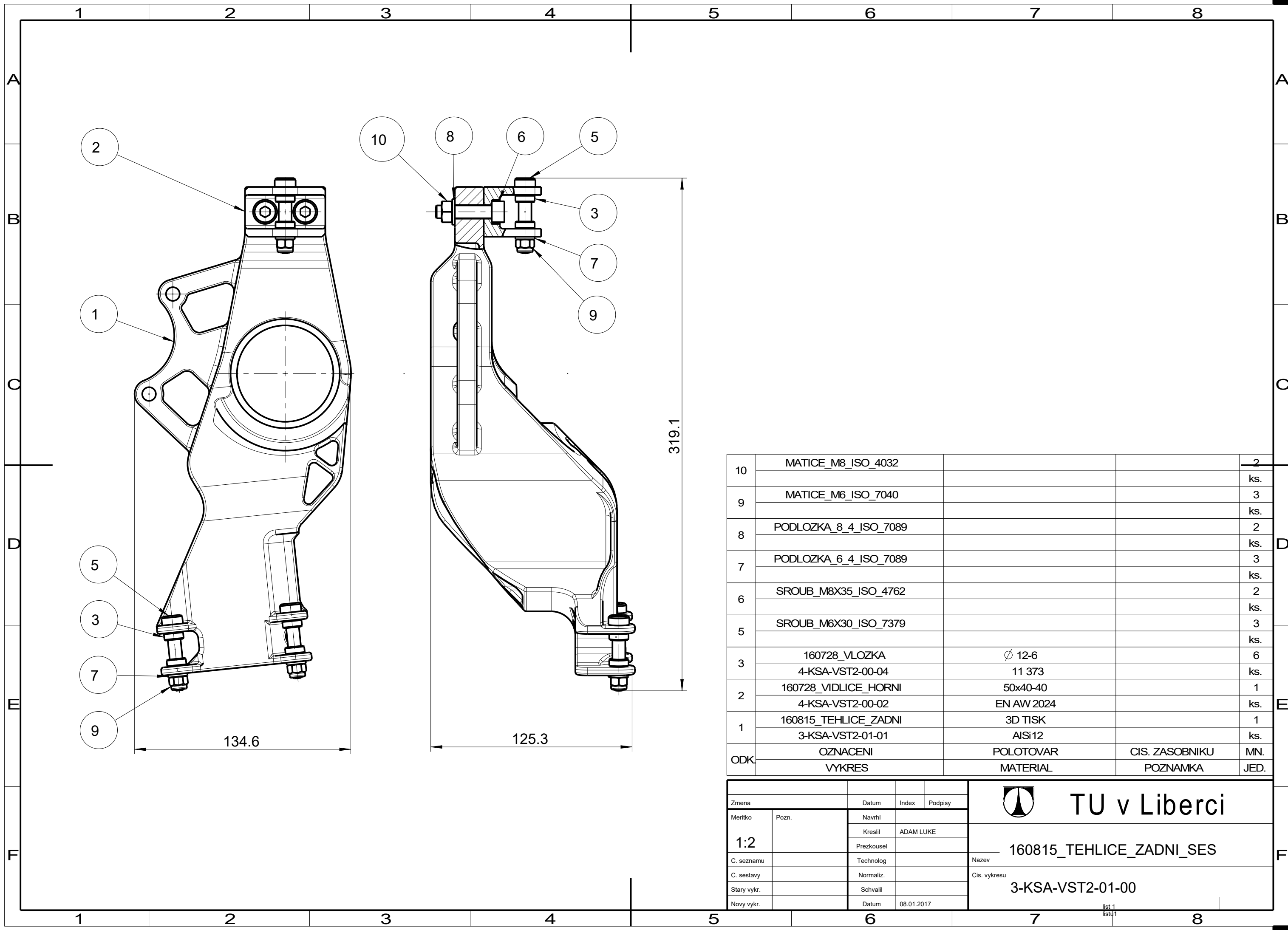
Roz. -Polot.		50x40-40					Presnost	
		c)	Mater.	EN AW 2024	Tr. odp	-	Tolerovani ISO 2768-mK	
		b)	C. hm	0.056 kg	Hr. hm.			
		a)						
Zmena		Datum	Index	Podpisy	<div> TU v Liberci</div> <div>Nazev160728_VIDLICE_HORNI</div> <div>Cis. vykresu4-KSA-VST2-00-02</div> <div>list 1 listu1</div>			
Meritko	Pozn.	Navrhl						
1:1		Kreslil	ADAM LUKE					
		Prezkousel						
C. seznamu		Technolog						
C. sestavy	KSA-DP-17-00-00	Normaliz.						
Stary vykr.		Schvail						
Novy vykr.		Datum	11-Aug-16					




Roz. -Polot.		80x40-110				Presnost		
		c)	Mater.	EN AW 2024	Tr. odp	-	Tolerovani ISO 2768-mK	
		b)	C. hm	0.215 kg	Hr. hm.			
		a)						
Zmena		Datum	Index	Podpisy				
Meritko 1:1	Pozn.	Navrhľ	 TU v Liberci					
		Kreslil						ADAM LUKE
		Prezkoušel						
C. seznamu		Technolog	Nazev					
C. sestavy	KSA-DP-17-00-00	Normaliz.	160728_VIDLICE_SPODNI					
Stary vykr.		Schvalil	Cis. vykresu					
Novy vykr.		Datum	08.01.2016	3-KSA-VST2-00-03				
				list 1 listu 1				

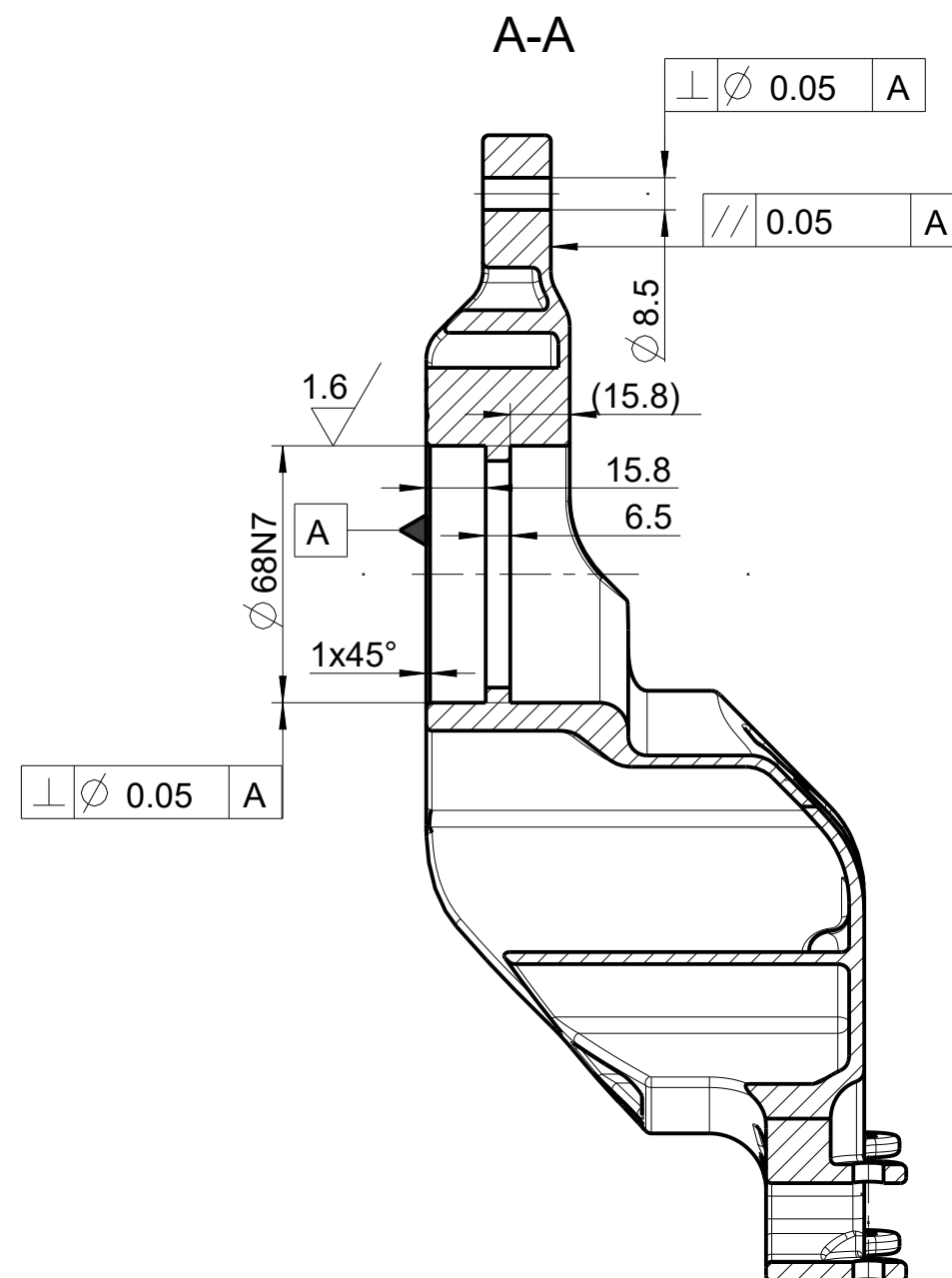
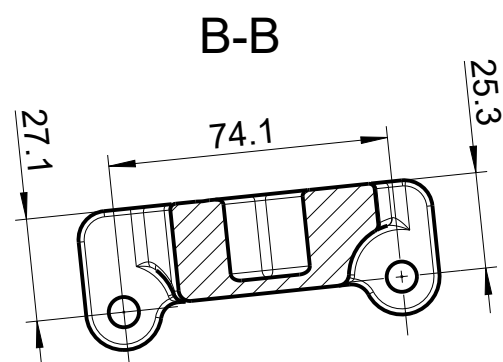
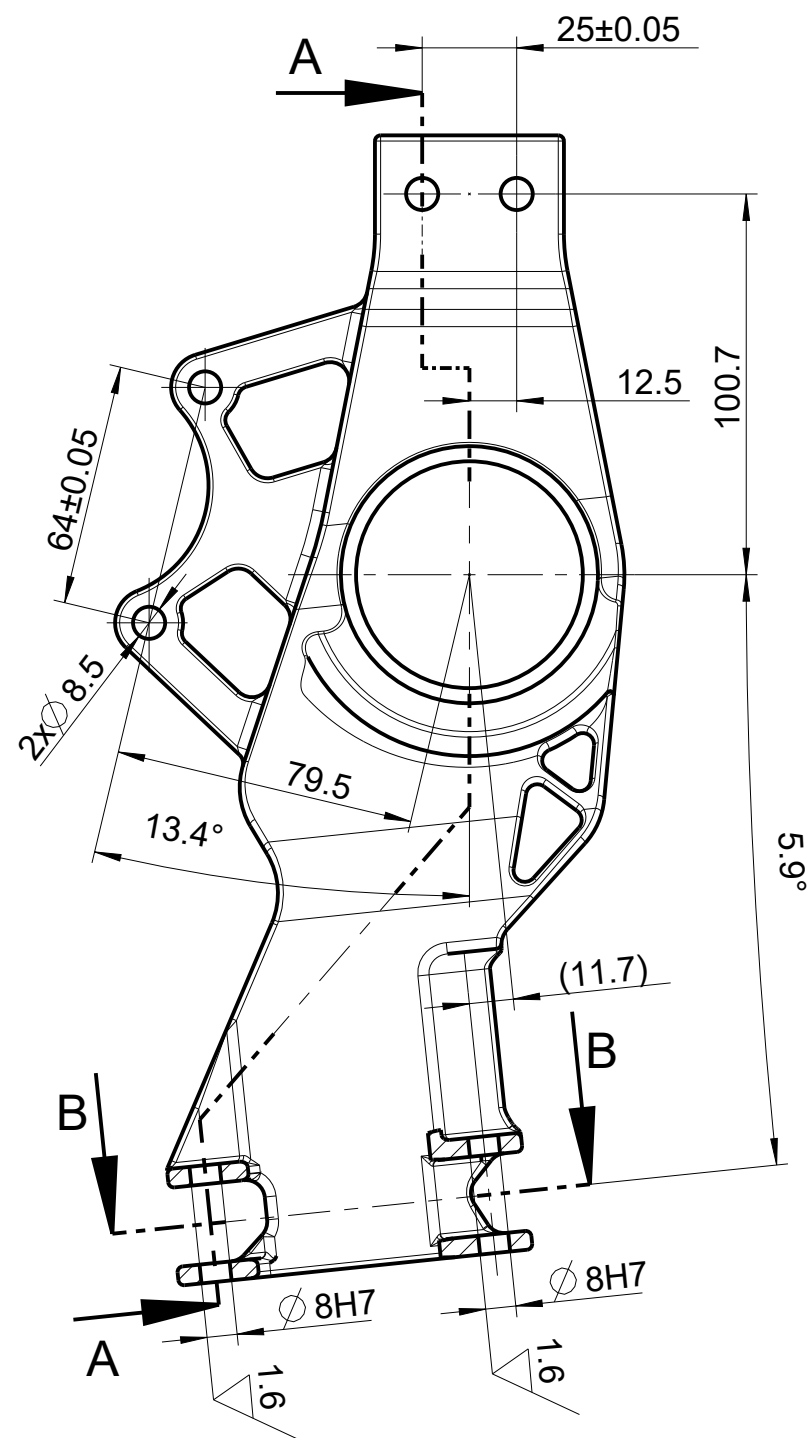


Roz. -Polot.		- Ø 12-6				Presnost	
		c)		Mater.	11 373	Tr. odp	-
		b)		C. hm	0.002 kg	Hr. hm.	
		a)					
Zmena		Datum	Index	Podpisy	<div> TU v Liberci</div> <div>Nazev 160728_VLOZKA</div> <div>Cis. vykresu 4-KSA-VST2-00-04</div> <div>list 1 listu 1</div>		
Meritko	Pozn.	Navrhl					
5:1		Kreslil	ADAM LUKE				
		Prezkousel					
		Technolog					
C. seznamu		Normaliz.					
C. sestavy	KSA-DP-17-00-00	Schvail					
Stary vykr.		Datum	08.01.2016				
Novy vykr.							




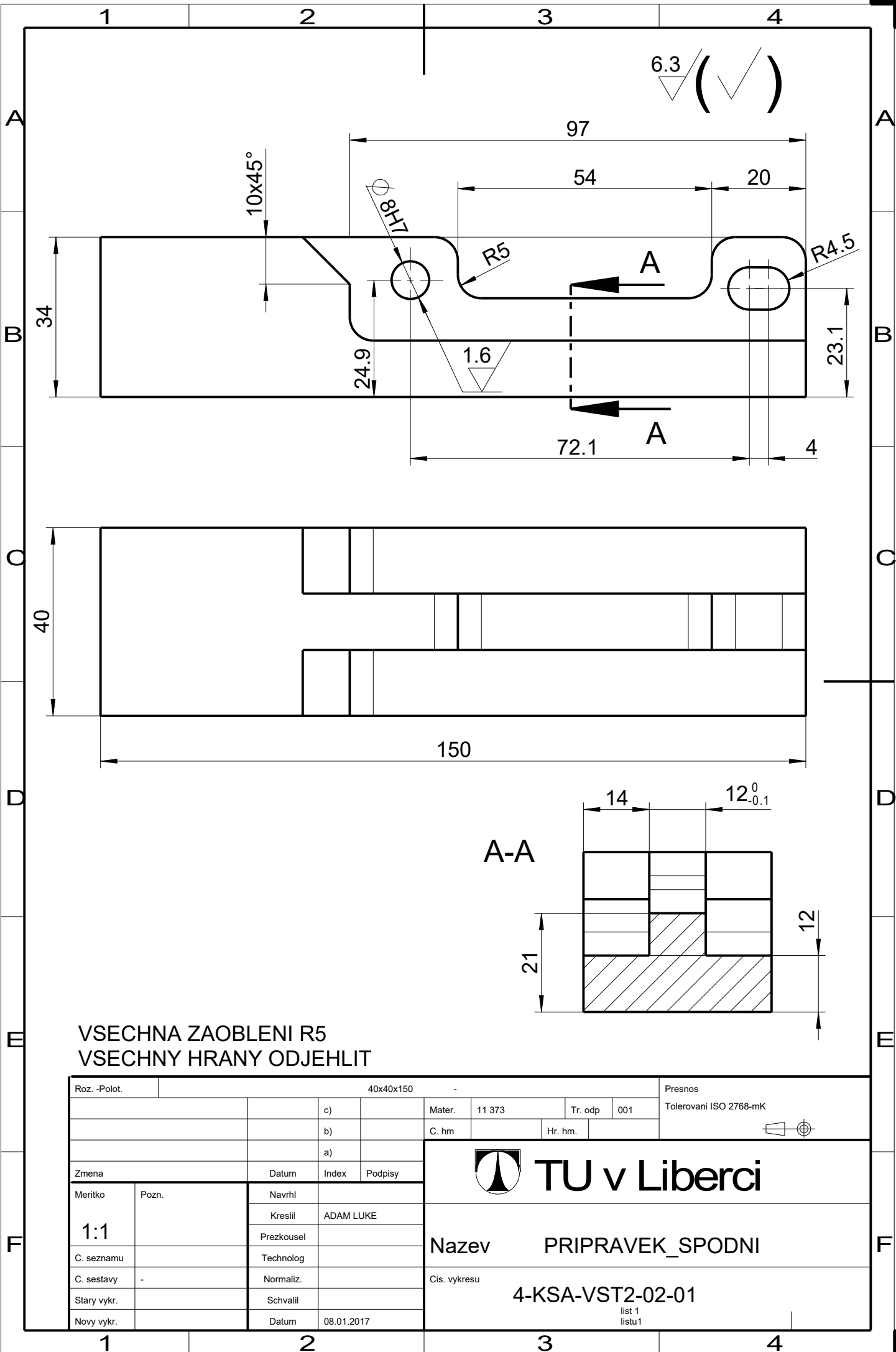
10	MATICE_M8_ISO_4032			2
				ks.
9	MATICE_M6_ISO_7040			3
				ks.
8	PODLOZKA_8_4_ISO_7089			2
				ks.
7	PODLOZKA_6_4_ISO_7089			3
				ks.
6	SROUB_M8X35_ISO_4762			2
				ks.
5	SROUB_M6X30_ISO_7379			3
				ks.
3	160728_VLOZKA	Ø 12-6		6
	4-KSA-VST2-00-04	11 373		ks.
2	160728_VIDLICE_HORNI	50x40-40		1
	4-KSA-VST2-00-02	EN AW 2024		ks.
1	160815_TEHLICE_ZADNI	3D TISK		1
	3-KSA-VST2-01-01	AISI12		ks.
ODK	OZNACENI	POLOTOVAR	CIS. ZASOBNIKU	MN.
	VYKRES	MATERIAL	POZNAMKA	JED.


						<div> TU v Liberci</div>
Zmena		Datum	Index	Podpisy		
Meritko 1:2	Pozn.	Navrhl				
		Kreslil	ADAM LUKE			
		Prezkousel				
C. seznamu		Technolog				Nazev 160815_TEHLICE_ZADNI_SES
C. sestavy		Normaliz.				Cis. vykresu 3-KSA-VST2-01-00
Stary vykr.		Schvalil				
Novy vykr.		Datum	08.01.2017			
		6		7		list 1 listu1
						8



ZAKOTOVANY POUZE FUNKCNI ROZMERY (DIL BUDE VYRABEN 3D TISKEM)

Roz. -Polot.		- 3D TISK				Presnos	
		c)		Mater.	AlSi12	Tr. odp	Tolerovani ISO 2768-mK
		b)		C. hm	1.197 kg	Hr. hm.	
		a)					
Zmena		Datum	Index	Podpisy	<div> TU v Liberci</div> <div>Nazev 160815_TEHLICE_ZADNI</div> <div>Cis. vykresu 3-KSA-VST2-01-01</div> <div>list 1 listu1</div>		
Meritko	Pozn.	Navrhl					
1:2		Kreslil	ADAM LUKE				
		Prezkousel					
C. seznamu		Technolog					
C. sestavy	KSA-DP-17-01-00	Normaliz.					
Stary vykr.		Schvalil					
Novy vykr.		Datum	08.01.2017				



Roz. -Polot.		40x40x150				-			Presnos		
		c)				Mater.	11 373		Tr. odp	001	Tolerovani ISO 2768-mK
		b)				C. hm			Hr. hm.		
		a)									
Zmena		Datum		Index	Podpisy		<div> TU v Liberci</div> <div>Nazev PRIPRAVEK_SPODNI</div> <div>Cis. vykresu 4-KSA-VST2-02-01</div> <div>list 1 listu 1</div>				
Meritko	Pozn.	Navrhl									
1:1		Kreslil		ADAM LUKE							
		Prezkousel									
	C. seznamu	Technolog									
C. sestavy	-	Normaliz.									
Stary vykr.		Schvalll									
Novy vykr.		Datum		08.01.2017							

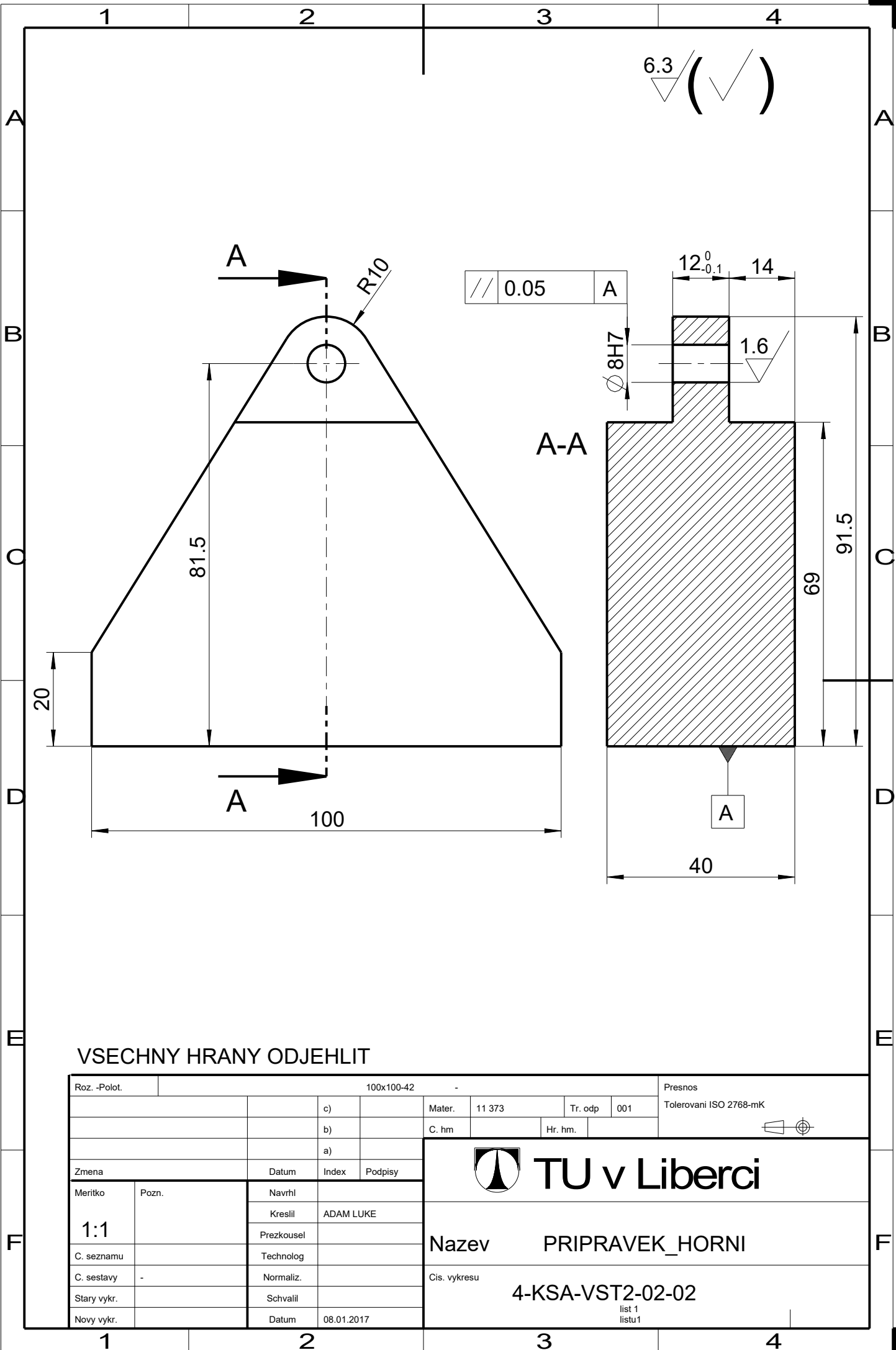


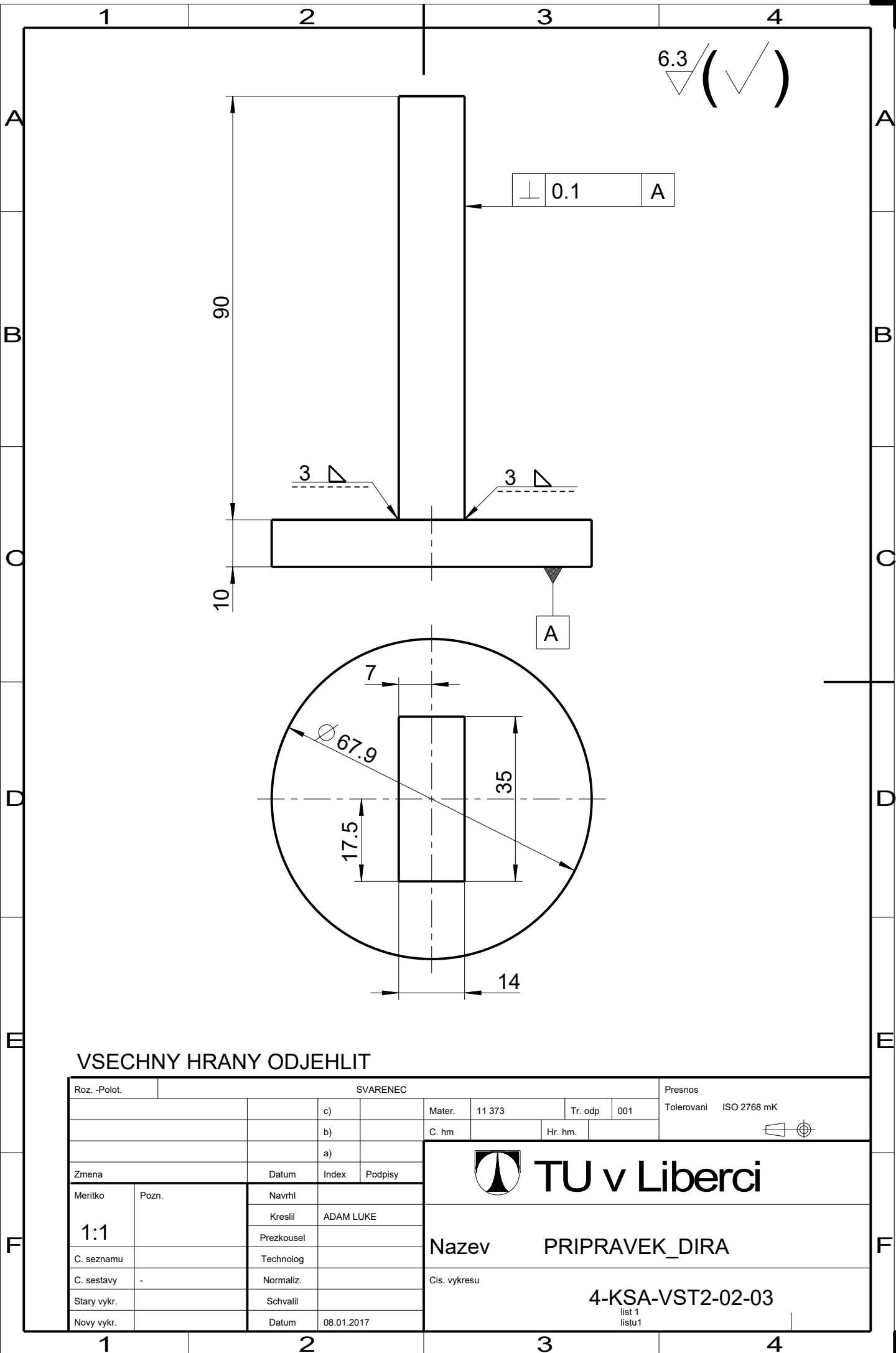
TU v Liberci

Nazev PRIPRAVEK_SPODNI


Cis. vykresu 4-KSA-VST2-02-01

list 1
listu1





VSECHNY HRANY ODJEHLIT

Roz. -Polot.		SVARENEC				Presnos	
		c)		Mater.	11 373	Tr. odp	001
		b)		C. hm		Hr. hm.	
		a)					
Zmena		Datum	Index	Podpisy	<div><h1>TU v Liberci</h1></div>		
Meritko	Pozn.	Navrhl					
1:1		Kreslil	ADAM LUKE				
C. seznamu		Prezkousel					
C. sestavy	-	Technolog					
C. sestavy	-	Normaliz.			NazevPRIPRAVEK_DIRA		
Stary vykr.		Schvail					
Novy vykr.		Datum	08.01.2017		Cis. vykresu <div>4-KSA-VST2-02-03</div> <div>list 1 listu1</div>		